

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

TATIANE CAZARIN DA SILVA

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS AO PROCESSO DE
EVACUAÇÃO DE AMBIENTES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE
VARIANTES GEOMÉTRICAS VIA AUTÔMATOS CELULARES
BIDIMENSIONAIS

CURITIBA

2012

TATIANE CAZARIN DA SILVA

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS AO PROCESSO DE
EVACUAÇÃO DE AMBIENTES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE
VARIANTES GEOMÉTRICAS VIA AUTÔMATOS CELULARES
BIDIMENSIONAIS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Área de Concentração em Programação Matemática do Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas e do Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Orientadora: Profa. Dra. Liliana Madalena Gramani

Co-Orientador: Prof. Dr. Eloy Kaviski

CURITIBA

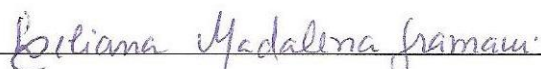
2012

TERMO DE APROVAÇÃO

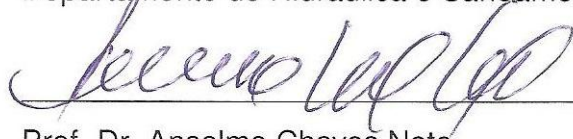
TATIANE CAZARIN DA SILVA

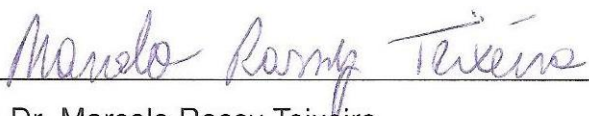
SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS APLICADAS AO PROCESSO DE EVACUAÇÃO DE AMBIENTES: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE VARIANTES GEOMÉTRICAS VIA AUTÔMATOS CELULARES BIDIMENSIONAIS

Dissertação aprovada como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre no Curso de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, do Departamento de Matemática, Setor de Ciências Exatas e do Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:

Orientadora: 
Profa. Dra. Lilitiana Madalena Gramani
Departamento de Matemática, UFPR

Co-Orientador: 
Prof. Dr. Eloy Kaviski
Departamento de Hidráulica e Saneamento, UFPR


Prof. Dr. Anselmo Chaves Neto
Departamento de Estatística, UFPR


Prof. Dr. Marcelo Rassy Teixeira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Pará - PPGEC/CT, UFPA

Curitiba, 27 de fevereiro de 2012.

Dedico a toda minha família, em especial a meu pai Luiz, pelo amor, dedicação, companheirismo em todos os momentos e por me ensinar o verdadeiro significado da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, pelo dom da vida e por estar sempre comigo, proporcionando oportunidades, momentos, caminhos e planos de vida.

Ao meu pai, Luiz, pelo imenso amor, carinho, apoio, estímulo, ensinamentos e proteção. Com certeza, com seus exemplos eu aprendi os melhores valores da vida.

À minha família, bisavós, avós, tios e primos, base da vida, pela força e apoio de onde quer que estejam.

À minha orientadora, Liliana, pelos ensinamentos, aprendizado, acompanhamento, dedicação e disposição na realização deste trabalho e durante o mestrado. Ao meu co-orientador, Eloy, pela paciência, disponibilidade, compreensão e dedicação durante todo o desenvolvimento do trabalho. Suas contribuições foram imprescindíveis a este estudo.

Aos meus amigos, Adriano, Juliano, Gislaine e Solange, pelo companheirismo, amizade, conselhos, estímulos, enfim, simplesmente por todos os momentos.

À Dona Aparecida, pela recepção e acolhida, durante todo esse período de estudos.

Aos professores do PPGMNE pelos ensinamentos e experiência transmitidos.

À todos os alunos do PPGMNE, que proporcionaram a divisão de muitos momentos de angústia, alegria e amizade, especialmente, aqueles com quem pude ter o prazer de conviver mais. Àquelas que também merecem um agradecimento mais que especial, minhas amigas Lilian e Vanessa.

À Angela Argenta, por fornecer materiais teóricos relacionadas à arquitetura que não seriam facilmente disponibilizados.

À Maristela Bandil, que com sua alegria, dedicação, espontaneidade e empenho, contribuiu em muito durante esse período.

Aos membros da banca, professores Anselmo e Marcelo, por aceitarem participar e contribuir no trabalho, muito obrigada.

À Capes, pelo apoio financeiro.

Tudo tem seu tempo e até certas manifestações mais vigorosas e
originais entram em voga ou saem de moda.
Mas a sabedoria tem uma vantagem: é eterna.
Baltasar Gracián

RESUMO

A modelagem do fluxo de pedestres por meio de simulações computacionais tem sido amplamente aplicada a problemas que envolvem multidão devido à capacidade de predição. O aumento do fluxo populacional nos grandes centros urbanos tem gerado preocupação quanto à necessidade de segurança e infraestrutura adequadas, imprescindíveis na minimização de transtornos decorrentes da inadequação ou violação dos recursos. Essas são características que conduzem a um estudo ainda maior sobre os fatos que podem afetar o comportamento de uma multidão numa situação de emergência. Modelos de simulação de dinâmica de pedestres são aplicados em fenômenos coletivos, destacando peculiaridades observadas em situações de evacuação, tais como otimização do espaço e minimização do tempo de evacuação de ambientes. Associado ao aprimoramento de projetos de construção, ao planejamento urbano e ao fortalecimento da dinâmica social as simulações de evacuação de ambientes em condições de emergência encontram-se diretamente relacionadas às evoluções temporais que, por sua vez, determinam um processo estocástico. Nesse sentido, a presente pesquisa apresenta resultados de simulações computacionais aplicadas ao processo de evacuação de uma sala de cinema, numa situação sem pânico, por meio da análise do tempo de evacuação total. O ambiente de simulação foi modelado a partir da análise de algumas normas e regras de arquitetura e segurança, tendo uma capacidade máxima de 130 pedestres. A fim de descrever as interações entre os campos de força dinâmica e estática, e a aleatoriedade do comportamento humano, as regras de interação decorrentes da delimitação do espaço e da movimentação são estabelecidas com o auxílio da teoria dos autômatos celulares bidimensionais, com vizinhança de Moore, e do Método de Simulação de Monte Carlo, desenvolvidos em linguagem Pascal. Para descrever o comportamento do fluxo de pedestres foram definidos alguns parâmetros, tais como tempo de reação, velocidade constante e minimização dos trajetos de saída. Por meio de variações no modelo foi possível adaptá-lo às restrições para cadeirantes, que alteram significativamente sua estrutura, já que se trabalha com elementos de áreas espaciais diferentes. Aplicando as simulações a diferentes lotações do espaço, considerando geometrias diferentes, destaca-se um modelo espacial de sala de cinema, dentre 5 casos analisados, que minimiza o tempo total de evacuação em função do número de pedestres, sob as hipóteses fixadas. Os resultados apontaram uma diferença significativa quanto à influência das limitações geométricas no sucesso da evacuação, chegando a aproximadamente 45% a diferença nos tempos finais obtidos. Destacando a relação entre o tempo total de evacuação e o número de pedestres de uma sala de cinema, verificou-se que existe uma dependência não linear entre tais parâmetros, validada estatisticamente, que descreve o comportamento do fluxo de pedestres e especificam características quando se trata da análise de evacuação de um ambiente.

Palavras-chave: Fluxo de pedestres. Simulações. Autômato celular. Monte Carlo. Evacuação.

ABSTRACT

The pedestrians modeling flow by computational simulations has been widely applied to problems that involve crowd due to the prediction capacity. The increase in population flow in big urban centers has created concern about the security and infrastructure appropriated, essential at the derangement minimization resulting from the inadequacy or resources violation. These are the characteristics that lead to a study even bigger about the facts that can affect the behavior from a crowd in an emergency situation. Pedestrians dynamic simulation models are applied to collective phenomenon, emphasizing peculiarities observed in evacuation situations, as space optimization and time minimization from environment evacuation. Associated to construction projects the improvement, to the urban planning and to the social dynamic strengthening the environment evacuation simulations in emergency conditions are directly related to the temporary evolutions that, in turn, determine a stochastic process. Accordingly, this research presents computational simulations results applied to an evacuation process from a movie theater room, in a no panic situation, by time analysis of total evacuation. The simulation environment was modeled by some norms and architecture and security rules analyses, having a maxim capacity of 130 pedestrians. In order to describe the interactions between the dynamic and static strength, and the human behavior randomness, the interaction rules resulting from the space delimitation and from the movement are established with the assistance of the two-dimensional cellular automata theory, annealing with Moore, and with the Monte Carlo Simulation Method, developed in Pascal language. To describe the pedestrian flow behavior were defined some guidelines, as reaction time, constant speed and the exit path minimization. By variations at the model it was possible to adapt it for the restrictions to wheelchair, which changes meaningfully its structure, since it is worked with elements from different geographic areas. Applying the simulations to different space capacity, considering different geometries, highlight a spatial movie theater room model, among 5 cases analyzed, that minimize the evacuation total time based on pedestrian number, under the hypotheses fixed. The results point to a meaningful difference about the geometrics limitations influence at the evacuation success, going the difference at the final time so far to approximately 45%. Highlighting the relation between the evacuation total time and the pedestrian number from a movie theater room, it was checked that it exists a non linear dependency between these parameters, statistically validated, that describes the pedestrian flow behavior and specify characteristics when it is about the environment evacuation analysis.

Key-words: Pedestrian flow. Simulations. Cellular automata. Monte carlo. Evacuation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – TERMO	ii
FIGURA 2 – VARIABILIDADE DE LOTAÇÃO NAS INSTALAÇÕES INTERNAS DO ESTÁDIO LONDRINO <i>WEMBLEY ST</i>	17
FIGURA 3 – INSTALAÇÕES EXTERNAS DE CINEMAS DOS SÉCULOS XIX E XX, RESPECTIVAMENTE	32
FIGURA 4 – DIMENSÕES DAS POLTRONAS	34
FIGURA 5 – RELAÇÃO ENTRE LARGURA DOS CORREDORES, SAÍDAS E LOTAÇÃO	34
FIGURA 6 – VARIANTES TOPOGRÁFICAS ENTRE AS ÁREAS PRINCIPAL E DO PÚBLICO	35
FIGURA 7 – DIMENSÕES DO MÓDULO DE REFERÊNCIA PARA PESSOA EM CADEIRA DE RODAS	36
FIGURA 8 – ESPAÇO RESERVADO PARA P.C.R. NA PRIMEIRA FILA, POR EXEMPLO	37
FIGURA 9 – ÁREA DE IMPLANTAÇÃO DE POLTRONAS: DISTÂNCIAS MÁ- XIMA E MÍNIMA	43
FIGURA 10– TIPOS DE VIZINHANÇA PARA O CASO BIDIMENSIONAL	50
FIGURA 11– IMAGENS INTERNAS DE 3 AMBIENTES DE CINEMA, COM VA- RIAÇÕES GEOMÉTRICAS	67
FIGURA 12– IMAGENS DAS PLANTAS BAIXAS DE 3 AMBIENTES DE CINEMA, NÃO IDENTIFICADOS	67
FIGURA 13– GEOMETRIA CARACTERIZADA NA SALA DE CINEMA CASO 1	68
FIGURA 14– GEOMETRIA CARACTERIZADA NA SALA DE CINEMA CASO 2	68
FIGURA 15– GEOMETRIA CARACTERIZADA NA SALA DE CINEMA CASO 3	69
FIGURA 16– GEOMETRIA CARACTERIZADA NA SALA DE CINEMA CASO 4	69

FIGURA 17– GEOMETRIA CARACTERIZADA NA SALA DE CINEMA CASO 5	69
FIGURA 18– DISPOSIÇÃO GEOMÉTRICA DA MALHA PARA O CASO BIDI- MENSIONAL	73
FIGURA 19– REPRESENTAÇÃO DA DENSIDADE MÁXIMA POR M^2	74
FIGURA 20– CARACTERIZAÇÃO DO ESTADO INICIAL DO AUTÔMATO CELU- LAR	76
FIGURA 21– ANÁLISE DA VIZINHANÇA PARA UM PEDESTRE P_{IJ} EM DOIS CASOS DISTINTOS	77
FIGURA 22– DISTINÇÃO ESPACIAL DOS MOVIMENTOS	79
FIGURA 23– MOVIMENTAÇÕES E ATUALIZAÇÃO NUMÉRICA DA MALHA PARA UM CASO PARTICULAR	81
FIGURA 24– REPRESENTAÇÃO DO ALGORITMO	84
FIGURA 25– POSSIBILIDADES DE MOVIMENTO	85
FIGURA 26– COMPARATIVO DOS TEMPOS DE EVACUAÇÃO PARA OS 5 CA- SOS ANALISADOS	97
FIGURA 27– TESTE DE NORMALIDADE PARA OS DADOS REFERENTES AO TEMPO MÉDIO DE EVACUAÇÃO DA SALA DE CINEMA - CASO 1	99
FIGURA 28– GRÁFICO DE DISPERSÃO PARA OS TEMPOS MÉDIOS TOTAIS ESTIMADOS PARA O AMBIENTE CASO 1	100
FIGURA 29– GRÁFICO DE PROBABILIDADE NORMAL - CASO 1	101
FIGURA 30– RESÍDUOS VERSUS ORDEM DE COLETA	102
FIGURA 31– REGRESSÃO POLINOMIAL - CASO 1	104
FIGURA 32– LOCAIS DESTINADOS A P.C.R. - CASO 1	108
FIGURA 33– ATUALIZAÇÃO NUMÉRICA DA MALHA PARA OS CASOS DE P.C.R., PARA CASOS ISOLADOS DE MOVIMENTAÇÕES LATERAIS (K, K') E FRONTAL (K'')	109

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1- CLASSIFICAÇÃO QUANTO À OCUPAÇÃO.....	40
QUADRO 2- CLASSIFICAÇÃO QUANTO À ALTURA.....	40
QUADRO 3- CLASSIFICAÇÃO QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS.....	41
QUADRO 4- ANÁLISE DE VARIÂNCIA APLICADA À REGRESSÃO POLINOMIAL CÚBICA.....	105
QUADRO 5- TESTE DE SIGNIFICÂNCIA DOS PARÂMETROS DA REGRESSÃO..	106

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	– ESPAÇOS DESTINADOS A P.C.R., P.M.R. E P.O., RESPECTIVAMENTE	37
TABELA 2	– CLASSIFICAÇÃO QUANTO ÀS CARACTERÍSTICAS DE LARGURA DAS SAÍDAS DO GRUPO F	41
TABELA 3	– RESULTADOS DAS 1000 SIMULAÇÕES REFERENTES AO TEMPO MÉDIO TOTAL DE EVACUAÇÃO DO AMBIENTE DESCRITO EM CASO 1 , APLICADAS EM 26 CASOS DE LOTAÇÃO	90
TABELA 4	– RESULTADOS DAS 1000 SIMULAÇÕES REFERENTES AO TEMPO MÉDIO TOTAL DE EVACUAÇÃO TOTAL DO AMBIENTE DESCRITO EM CASO 2 , APLICADOS EM 26 CASOS DE LOTAÇÃO	91
TABELA 5	– RESULTADOS DAS 1000 SIMULAÇÕES REFERENTES AO TEMPO MÉDIO TOTAL DE EVACUAÇÃO TOTAL DO AMBIENTE DESCRITO EM CASO 3 , APLICADOS EM 26 CASOS DE OCUPAÇÃO	92
TABELA 6	– RESULTADOS DAS 1000 SIMULAÇÕES REFERENTES AO TEMPO MÉDIO TOTAL DE EVACUAÇÃO TOTAL DO AMBIENTE DESCRITO EM CASO 4 , APLICADOS EM 26 CASOS DE OCUPAÇÃO	93
TABELA 7	– RESULTADOS DAS 1000 SIMULAÇÕES REFERENTES AO TEMPO MÉDIO TOTAL DE EVACUAÇÃO TOTAL DO AMBIENTE DESCRITO EM CASO 5 , APLICADOS EM 26 CASOS DE OCUPAÇÃO	94
TABELA 8	– RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES PARA OS 5 CASOS DE GEOMETRIA ANALISADOS	95
TABELA 9	– ESCORES DOS RESÍDUOS - CASO 1	102
TABELA 10	– COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO NO AJUSTE POLINOMIAL	103
TABELA 11	– EQUAÇÃO DE REGRESSÃO PARA OS 5 CASOS ANALISADOS	107
TABELA 12	– RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES COM INCLUSÃO DOS ESPAÇOS PARA P.C.R. PARA O AMBIENTE CASO 1	111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	17
1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
1.3 OBJETIVOS	23
1.3.1 Objetivo Geral	23
1.3.2 Objetivos Específicos	23
1.4 JUSTIFICATIVA	24
1.5 LIMITAÇÕES	28
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO	28
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1 UMA BREVE HISTÓRIA DO SURGIMENTO DO CINEMA NO MUNDO E NO BRASIL	30
2.2 ARQUITETURA	33
2.2.1 Normas geométricas para salas de cinemas	33
2.3 NORMAS DE SEGURANÇA	35
2.3.1 Norma Brasileira ABNT NBR 9050	35
2.3.2 Órgãos responsáveis pela fiscalização e liberação de obras: características observadas	38
2.3.2.1 Classificações quanto à ocupação, altura, saídas e características constru- tivas	39
2.3.2.2 Associação Brasileira de Cinematografia - ABC	42
2.4 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DE PEDESTRES	43
2.4.1 Modelos relacionados a avaliação do fluxo de pedestres	44

2.5 AUTÔMATOS CELULARES	47
2.5.1 Caracterização de um autômato celular	49
2.5.2 Definição de autômato celular	50
2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	53
2.7 MÉTODO DE MONTE CARLO	56
2.8 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA	58
2.8.1 Distribuição normal ou Gaussiana	59
2.9 REGRESSÃO POLINOMIAL POR MEIO DO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRA- DOS	62
2.9.1 Ajustamento cúbico ou cúbica dos Mínimos Quadrados	63
2.9.2 Teste de Durbin Watson	65
3 MODELAGEM	66
3.1 O AMBIENTE DE MODELAGEM	66
3.2 ADAPTAÇÃO AO MODELO	72
3.2.1 Descrição da modelagem	75
3.2.2 Aplicação da modelagem	78
3.2.3 Formulação do algoritmo	81
3.2.4 Escolha dos parâmetros	85
4 RESULTADOS	88
4.1 SIMULAÇÕES	89
4.1.1 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente Caso 1	89
4.1.2 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente Caso 2	91
4.1.3 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente Caso 3	92
4.1.4 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente Caso 4	93
4.1.5 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente Caso 5	93
4.2 COMPARAÇÃO NUMÉRICA DOS CASOS ANALISADOS	94

4.3 FORMULAÇÃO ESTATÍSTICA DO MODELO	98
4.3.1 Teste de Gaussianidade	98
4.3.2 Relacionamento entre as variáveis tempo médio de evacuação e número de pedestres para o ambiente Caso 1	100
4.3.3 Modelos de regressão para os 5 casos analisados	107
4.4 VARIAÇÕES E ADAPTAÇÕES AO MODELO	107
5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	114
REFERÊNCIAS	118
APÊNDICE A – CINE_MOV: CÓDIGO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DO CINEMA - CASO 1	123

1 INTRODUÇÃO

A história da humanidade encontra-se marcada pela constante busca por melhores condições de vida. Seja relacionada a questões geográficas, econômicas ou sociais, essa procura é definida, muitas vezes, por necessidades básicas de sobrevivência. Torna-se comum, as pessoas recorrerem a regiões mais desenvolvidas, pois ao menos teoricamente, podem oferecer subsídios ou oportunidades que possibilitem uma melhoria na qualidade de vida. Percebe-se, então, um aumento populacional significativo e gradativo nos centros urbanos e nas regiões industrializadas, que pode ser explicado, por atuarem como um atrativo face as oportunidades ofertadas.

Porém, para que haja avanços e estabilidade no mercado competitivo não é necessário apenas adequação à mão de obra qualificada, mas também, paralelamente, o desenvolvimento do espaço físico. É preciso que tais regiões estejam devidamente estruturadas, ponderando os avanços tecnológicos aos espaciais, visto que atuam como receptoras diretas de material humano, e por sua vez, os setores relacionados à infraestrutura, tais como engenharia, economia e tecnologia, devem estar fortemente amparados. Utilizando um planejamento propício, modelado por constantes mudanças e/ou adaptações, a penalização decorrente do desequilíbrio populacional pode ser menor, já que a distribuição dos recursos torna-se pré definida.

Para garantir a segurança física de qualquer ambiente, seja público ou não, com demanda significativa, existem normas e regras de edificações que devem ser consideradas na elaboração dos projetos. Tais normas baseiam-se principalmente no tipo de ambiente analisado, que podem definir o comportamento humano em uma situação de evacuação, por exemplo. Aliado a tais análises, destacam-se características importantes do fluxo de pedestres¹.

¹O termo pedestre designa-se a um indivíduo/pessoa que caminha, realiza uma trajetória percorrida a pé. Por conveniência, optou-se em utilizar o termo pedestre face a natureza da pesquisa.

Tratando-se de um espaço físico, a trajetória realizada por um pedestre pode ser interferida por questões comportamentais ou físicas que, por sua vez, alteram o fluxo normal. De acordo com Bicho (2009) a modelagem e simulação de multidões, caracterizada por um alto fluxo populacional, são temas de estudo em diferentes áreas da ciência, pois garantem um vasto campo aplicativo no que tange o fluxo de pedestres. Nesse sentido, nas últimas décadas destacam-se estudos relacionados à simulação de multidões, buscando responder questões associadas desde a escolha de um caminho até a simulação de situações marcadas pelo pânico (ZAMPIERI, 2006).

Levando em consideração as ações humanas, com ou sem pânico, é possível associá-las à modelos matemáticos, ou simulações computacionais, estabelecendo parâmetros associados às características do fenômeno envolvido. Pode-se obter resultados que realmente se aproximem do real, por meio da inclusão de variáveis voltadas à tomada de decisão.

Dessa forma, o comportamento de pedestres diante de situações de evacuação destaca características que podem explicar o processo de otimização do espaço e minimização do tempo. Nesse contexto, a utilização de simulações computacionais aplicadas ao fluxo de pedestres representa grande importância no aprimoramento de projetos de construção e adequação de espaços, no planejamento urbano e no fortalecimento da dinâmica social, por meio do estudo da dinâmica de pedestres.

A fim de aplicar as simulações computacionais dirigidas a uma situação que envolva multidão, visou-se estabelecer um modelo de simulação de evacuação, em escala microscópica, aplicada a uma situação de evacuação de um ambiente fictício. Tal ambiente foi determinado de forma a satisfazer as restrições e normas técnicas de uma sala de cinema, por meio da variação geométrica de disposição das poltronas. As análises foram realizadas com a aplicação dos autômatos celulares bidimensionais como uma alternativa de discretizar o ambiente e estabelecer as relações de interação dos pedestres, proporcionadas pelo Método de Simulação de Monte Carlo.

1.1 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A lotação de um mesmo espaço pode sofrer variabilidade significativa quanto ao número de pedestres durante pequenos intervalos de tempo, que por sua vez, pode não ser precisamente calculada. Sendo assim, é necessário estabelecer características *a priori* que viabilizem o fluxo de pedestres em quaisquer situações, garantindo normalidade em possíveis alterações de suas atividades.

Analizando as questões referentes a um espaço físico, pode-se perceber que tratando-se de meios susceptíveis a um alto fluxo de pedestres, é comum ocorrerem aglomerações, principalmente em locais públicos e em horários específicos, denominados horários de pico². A figura 2, apresentada a seguir, ilustra a variabilidade na demanda de pedestres de acordo com o tempo, permitindo uma comparação na instalação interna em dois casos, vazia e congestionada, respectivamente.



(a) Ambiente vazio



(b) Ambiente congestionado

FIGURA 1: Variabilidade de lotação nas instalações internas do estádio londrino *Wembley St*

FONTE: Steinberg (2005)

Os casos de aglomeração, ou "multidão", são pontuados por envolverem um alto número de pedestres com características distintas num mesmo espaço físico. Nesses casos, além da interação entre pedestre e meio, tem-se a interação entre pedestres. Diversas situações são marcadas pelo estudo do comportamento de multi-

²Denomina-se horário de pico ao horário de maior movimento, no qual o fluxo de pedestres é mais intenso.

dões, tais como a simulação de multidões aplicadas em produções cinematográficas, jogos digitais, planejamento de construções, evacuação de ambientes complexos, arquitetura, dentre outras (BICHO, 2009; DAPPER, 2007). Esse estudo quando associado à simulação pode descrever e até prever acontecimentos envolvendo a segurança pública, evitando assim, transtornos decorrentes do planejamento e infraestrutura inadequados, possibilitando descrever o comportamento humano diante de algumas situações.

Seja em cinemas individuais ou situados em centros comerciais, tais como *shoppings*, a vulnerabilidade para incêndio ou outras peculiaridades é alta, consequentemente, deve-se haver maiores investimentos em fiscalização. Dentre os fatores que integram as avaliações associadas a falta de segurança dos cinemas, destacam-se o número e a localização de saídas de emergência e o comprimento dos caminhos numa situação de evacuação (OLIVEIRA, 2003). Considerando o caso específico das salas de cinemas, tratam-se de ambientes públicos voltados a uma diversidade de espectadores. Sendo assim, características típicas da geometria dos cinemas conduzem a estudos referentes à melhoria da disposição geométrica a fim de maximizar a segurança dos espectadores numa situação de evacuação de emergência por meio da modelagem do comportamento do fluxo associada a tal situação.

1.2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir são apresentados alguns trabalhos referentes ao estudo do comportamento de pedestres.

Toyama (2006), em sua dissertação de mestrado, "Uma abordagem Multiagentes para a Dinâmica de pedestres", propôs a análise de um modelo que caracteriza o comportamento macroscópico de uma multidão, por meio da análise de certas variáveis, tais como sexo, velocidade, conhecimento do ambiente e comportamento do grupo. Expõe uma abordagem teórica do Modelo de Forças Sociais para Dinâmica de Pedestres, autômatos celulares e Sistemas Multiagentes seguida por uma compara-

ção dos mesmos. Destaca um modelo baseado em sistemas multiagentes, propondo uma melhoria *Walker* para o modelo estocástico de Schadschneider, encontrando características relevantes na aplicação, que objetiva verificar como tais variáveis alteram a dinâmica e o comportamento macroscópico dos pedestres.

Helbing (1998), em *A Mathematical Model for the Behavior of Pedestrians*, destaca que embora o fluxo de pedestres seja marcado pela individualidade dos elementos envolvidos, tal análise não é necessariamente aleatória, pois o movimento de um pedestre caracteriza-se pela minimização do tempo, otimização do trajeto e uniformidade da velocidade. Dessa forma, essas são suposições que pré definem o comportamento humano, e por sua vez, devem ser pontualmente verificadas. Entretanto, além das características de atração e repulsão, existem quatro razões que tendem ao desvio do comportamento adequado, sendo nomeadas por Helbing, como flutuações do modelo, sendo elas:

- (i) o pedestre depara-se com uma situação fora do padrão;
- (ii) não há conhecimento da melhor estratégia a ser utilizada;
- (iii) o fator emocional pode interferir no desempenho racional;
- (iv) o modelo pode sofrer imperfeições.

Com base nas suposições, o autor expõe características do modelo, que levam em consideração fatores como velocidade, densidade e comportamento em grupos, podendo ocasionar na formação de filas.

Teknomo (2006), em *Application of microscopic pedestrian simulation model*, propôs uma generalização do estudo de caso proposto por Helbing, Keltsch e Molnar (1997) por meio da aplicação da escala microscópica no modelo de Teknomo (2002). A simulação é dada a partir da suposição de que o movimento é duas vezes diferenciável e, o pedestre está sujeito a duas forças: avanço ao ponto desejado e a força de repulsão, que definem a diferença entre a velocidade real e a prevista. Verifica que utilizando a escala microscópica pode-se destacar outras formas de controles de fluxo

no tempo, espaço e direção, o que por consequência conduz a um melhor modelo de fluxo de tráfego. Nessa escala, destaca-se que há uma diminuição da interação pedonal, assim, os pedestres tendem a repetir o caminho e a traçar o seu próprio. Além disso, traz uma abordagem hipotética, ponderando a porcentagem de idosos acrescentados ao modelo face a velocidade atingida, na qual, obtém-se uma alteração do modelo, já que há suposição de diminuição da velocidade constante.

Helbing, Farkas e Vicsek (2000), em *Simulating Dynamical Features of Escape Panic*, apresentam um modelo contínuo de pedestres, baseado em forças generalizadas, caracterizado por simplicidade e robustez em relação a variações dos parâmetros, apropriado para situações que envolvam pânico. Assim, assumem uma mistura de forças sócio-psicológicas e físicas que influenciam o comportamento de uma multidão, além de algumas observações do fenômeno de pânico, tais como:

- Variação e aumento da velocidade normal;
- Interações físicas;
- Ausência de coordenação dos movimentos;
- Entupimentos e aglomerações nas saídas;
- Danos à estrutura física do ambiente;
- Pisoteamentos ou o escape é mais retardado por pessoas caídas ou feridos que se transformam em “obstáculos”;
- Tendência de “massa comportamento”, ou seja, repetir o comportamento de outras pessoas;
- Ineficiência ou ignorância de saídas alternativas presentes em situações de fuga.

Como resultados de grande relevância do modelo, e que são largamente utilizados por pesquisas na área, os autores foram capazes de simular situações de escassez de recursos e estimar o número de vítimas, sendo usado para testar edifícios quanto a sua adequação em situações de emergência, além da reprodução de

muitos fenômenos observados, incluindo acúmulo de pressão, efeitos de entupimento em pontos de estrangulamento, interferência em ampliações, efeitos “mais rápido” e “mais lento”, e o uso ineficiente de saídas alternativas ocasionada pelo pânico por contrafluxos e impaciência.

Kulakowski, Was e Topa (2010), apresentam em *Simulation Environment for Modeling Pedestrian Dynamics* uma nova abordagem, *Model-View-Controller*, baseada em ambiente de simulação de dinâmica de modelagem de pedestres, por meio da utilização de conceitos no campo da dinâmica de pedestres e teoria da simulação. O modelo, baseado em autômato celular, foi acrescido por novas funcionalidades, tais como: a função de ganho complexo usado para descrever o processo de tomada de decisão e a possibilidade de descrever as diferentes classes de situações, por uma nova arquitetura, flexível, eficiente e orientada a objetos, projetada para simulações de dinâmica de pedestres.

Jian, Lizhong e Daoliang (2005), em *Simulation of bi-direction pedestrian movement in corridor*, destacam inicialmente que o fluxo de pedestres torna-se mais complexo do que o fluxo veicular devido ao fato de que além das influências sócio-psicológicas que podem interferir na modelagem, os indivíduos podem mudar bruscamente suas direções, escolhendo um melhor caminho não limitado apenas por pistas ou faixas. É estabelecido um modelo de circulação pedonal bidimensional, cuja estrutura é analisada com base em autômato celular, e o comportamento dos pedestres é descrito utilizando Von Neumann, já que há dependência na correspondência entre as células. São incluídos nos modelos algumas regras e parâmetros, mostrando resultados significativos quanto a dependência das variáveis envolvidas.

Helbing et al. (2002), em *Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations*, descrevem o fenômeno de multidão, e o caracterizam diante de situações ditas normais, e em pânico. Os autores propuseram um modelo, baseado em forças sociais, que apresentou-se ótimo devido a mistura apropriada de comportamento individualista e em grupo.

Larrãnaga (2008), desenvolveu em seu trabalho de dissertação uma análise sobre o padrão comportamental do pedestre buscando identificar quais as variáveis que interferem na escolha do caminho a ser traçado, num estudo de caso na cidade de Porto Alegre-RS. Adotou modelos *logit binomiais* para verificar a sensibilidade, o comportamento e a acessibilidade de determinadas regiões pelos pedestres, diante de algumas características físicas e sócio-econômicas nos casos analisados. Assim, tornou-se possível, caracterizar as regiões da cidade e os fatores que determinam o padrão comportamental dos pedestres, em sua trajetória a pé.

Bicho (2009) propõe um novo método para simulação de multidões *BioCrowds* baseado no algoritmo de colonização do espaço proposto por Runions et al. (2005) e Runions, Lane e Prusinkiewicz (2007), inspirado em padrões biológicos, relacionando-o a reprodução da dinâmica de multidões. O autor associa o comportamento da multidão ao padrão de crescimento e movimento das nervuras em folhas vegetais, que devem ser obedecidas no desenvolvimento biológico: o fluxo de auxinas, responsável pelo crescimento, é canalizado pelas nervuras da lâmina da folha, ocasionando o fluxo que por sua vez gera ramificações. Bicho, propõe um modelo de simulação que associa os padrões do crescimento biológico das folhas vegetais, com o comportamento dos agentes numa situação de simulação de multidões.

Zampieri (2006) expõe, em sua dissertação, um Modelo Estimativo de Movimento de Pedestres baseado em sintaxe espacial, medidas de desempenho e redes neurais artificiais. Destaca a importância do estudo do comportamento de pedestres na implicação e quantifica os passeios, ou seja, a trajetória descrita. Sendo assim, o autor propõe um modelo, baseado em Redes Neurais Artificiais, que estabelece a relação entre o fluxo de pedestres e as propriedades do espaço urbano. Por meio da aplicação da metodologia de Sistemas Multiagentes analisa a circulação de pedestres e suas principais características na região central da cidade de Santa Maria - RS.

Dapper (2007) apresenta, no seu trabalho de dissertação, um planejamento de movimento para pedestres utilizando Campos Potenciais. Afirma que o compor-

tamento de cada pedestre, ou agente, é definido por uma alteração de seu campo potencial individual. As características dinâmicas do padrão podem ser alteradas em cada passo da simulação. Assim, podem ser evitadas colisões com obstáculos móveis ou combinar a complexidade dos movimentos. Para essa análise, Dapper utiliza o método baseado em campos potenciais gerados pela solução numérica de problemas de valores de contorno envolvendo a equação de Laplace e o problema de Sturm-Liouville.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um modelo matemático de simulação de evacuação de ambientes, possibilitando relacionar o tempo de evacuação total numa situação de emergência com as restrições espaciais e geométricas de uma sala de cinema, propondo um método de análise que associe um ajuste da teoria dos autômatos celulares em conjunto com o Método de Simulação de Monte Carlo na definição de um modelo estatístico que permita associar tais parâmetros ao estudo do comportamento do fluxo de pedestres.

1.3.2 Objetivos Específicos

Com o desenvolvimento da pesquisa será possível:

1. identificar os fatores que influenciam na trajetória de um pedestre, sejam físicos ou espaciais;
2. relacionar as interações bidimensionais por meio de uma modificação na teoria de autômatos celulares;
3. determinar um modelo, com variáveis estatísticas, que permita descrever o comportamento do fluxo de pedestres;

4. utilizar a simulação de sistemas dinâmicos de pedestres na análise do tempo de evacuação de ambientes;
5. estabelecer uma comparação entre diferentes tipos de disposições geométricas para uma sala de cinema, de forma a estabelecer possíveis relações de dependência.

1.4 JUSTIFICATIVA

Além da necessidade de se investigar questões referentes ao tráfego veicular, tem-se como destaque o tráfego de pedestres, que admite grande complexidade face à vulnerabilidade humana na tomada de decisões. Qualquer ambiente ou espaço físico encontra-se susceptível a ação de forças externas que podem conduzir a deformações na estrutura e/ou alteração no fluxo normal dos pedestres, de causa natural, estrutural ou humana, tais como: explosões, incêndios, enchentes, ventos fortes, liberação de gases tóxicos, derrames químicos, distúrbios civis, violência, deficiências na estrutura, entre outros.

Tais condições geralmente levam a situações de evacuação de emergência, de forma a garantir a integridade física das pessoas. Para que esse procedimento obtenha sucesso esperado, é necessário adotar regras e respeitar normas técnicas existentes e que devem ser empregadas na liberação das obras, a fim de minimizar possíveis tragédias e transtornos. Sendo assim, são construídos planos de evacuação de emergência, que podem ser empregados em tais situações e, muitas vezes, são utilizados procedimentos de testes para a evacuação, predizendo situações difíceis caso fossem consideradas num caso real.

Mesmo que a legislação da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), Normas ISO de Qualidade, Códigos de Posturas Municipais, Normas do Ministério do Trabalho, Legislações de Segurança contra Incêndio e Pânico Estaduais e outros instrumentos sejam muito úteis na prevenção de acidentes, muitas vezes acabam não sendo suficientes. Pode haver negligência de características importantes na

manutenção da segurança total, na delimitação ou organização do espaço, muitas vezes caracterizando fatores alheios e inesperados (SOUZA, 2005).

Nesse sentido, alguns locais liberados para uso público necessitaram realizar procedimentos de evacuação, em situações de emergência, sendo alguns destacados a seguir: 2007 - *Shopping Total* (RS), *Manaira Shopping* (PB), *Shopping Anália Franco* (SP); 2008 - *Shopping Unicenter* (AR), *Metrô-SP*, *Linha Azul* (SP), *Shopping Três Américas* (MT); 2009 - *Shopping Flamboyant* (GO), *Shopping Bourbon* (SP); 2010 - *Open Shopping Cianorte* (PR); 2011 - *Joinville Garten Shopping* (SC); *Shopping Burlington Massachusetts* (USA).

Como se tratam de locais liberados para uso público existem fatores externos que podem atenuar os riscos e conseqüentemente, ocasionar tragédias, como geralmente ocorrem em estádios de futebol, devido à lotação. Nesse contexto destacam-se alguns casos, que associados a tais condições envolveram multidão em estádios: 1964 - Lima, Peru; 1968 - Buenos Aires, Argentina; 1971 - Glasgow, Escócia; 1974 - Cairo, Egito; 1982 - Moscou, Rússia; 1985 - Bradford, Inglaterra; 1988 - Katmandu, Nepal; 1989 - Sheffield, Inglaterra; 1996 - Cidade da Guatemala, Guatemala e 2001 - Accra, Gana.

Dessa forma, pode-se verificar que o cumprimento dos critérios legais não garante a aniquilação de situações de evacuação de emergência, mas sua prevenção. Conseqüentemente, em tais situações podem ocorrer deformações na descrição espacial do ambiente com proporções não mensuráveis. Com isso torna-se necessário identificar também o comportamento do fluxo de pedestres associados às limitações do ambiente, a fim de ponderar possíveis adequações. A utilização de simulações computacionais aplicadas à dinâmica de pedestres facilita no entendimento de características básicas sobre o fluxo, tornando-se ferramenta essencial para descrever informações relacionadas à formulação de saídas, geometrias de salas e estádios (PEREZ, 2002).

Nesse sentido, vale destacar que a não utilização das simulações computa-

cionais ou de demais experimentações, podem interferir significativamente no sucesso do processo de evacuação de um ambiente. Mesmo que respeitadas normas de segurança, os padrões de comportamento são fundamentais no estabelecimento de características associadas ao fluxo de pedestres. Um exemplo que ilustra tal importância é apresentado a seguir.

O Coliseu é considerado o monumento mais antigo de Roma, construído no ano de 79 d.C.. O estádio *Wembley St* foi criado em 1923 sendo conhecido como a maior arena esportiva do mundo. Tais ambientes destacam-se pela arquitetura e estrutura, sendo essas características próprias da época em que foram planejados. O desenvolvimento e aprimoramento arquitetônico sugere melhorias nas questões relacionadas à segurança, já que as normas de edificações são constantemente adaptadas e obras mais recentes tendem a ser melhor planejadas. Por sua vez, considerando os dois ambientes destacados, essa relação não foi satisfeita. Para o caso da evacuação de tais ambientes, estudos referentes às simulações computacionais apontaram que o tempo de evacuação do Coliseu é menor do que o obtido na evacuação do estádio.

Esse fato destaca que a experiência e grandiosidade romana em construções ou experimentações, tornou-se mais eficaz do que o planejamento técnico de estruturas. Sendo assim, valoriza-se a importância de experimentações e simulações no estudo e adaptação de projetos, que podem ser aprimorados face o conhecimento real e empírico das características que definem o comportamento do fluxo de pedestres nas mais diversas situações.

Helbing et al. (2002) apresentam um modelo de simulação de dinâmica de pedestres em fenômenos coletivos que destaca algumas características observadas em situações normais de evacuação: formação de pista³ e fluxos oscilatórios com os gargalos⁴. Por meio de simulações microscópicas baseadas em um modelo de força

³Fenômeno geométrico observado pela sequência, muitas vezes ordenada, de elementos num mesmo ambiente.

⁴Regiões estreitas e/ou afunilamentos presentes no espaço físico, tais como corredores, escadas e saídas.

generalizada, os autores ponderaram que os padrões do movimento coletivo podem ser interpretados como um fenômeno de auto-organização, decorrente da interação entre os pedestres.

Considerando ambientes com uso permitido para o público, nos quais a demanda é variável, pode-se empregar as simulações como uma alternativa para prever o comportamento dos pedestres numa situação específica, de evacuação emergencial, na qual questões associadas a geometria são determinantes. O estabelecimento de critérios e normas relacionados à edificações e integridade física encontram-se em constante adaptação, muitas vezes aprimorados por experimentos numéricos. Consequentemente, possíveis adaptações podem ser realizadas com antecedência, evitando assim, gastos e readequações futuras, sejam financeiras ou de segurança. Criar uma modelagem específica a um ambiente e verificar como variações geométricas em sua estrutura se comportam mediante um processo de evacuação são características fundamentais para verificar critérios associados ao fluxo de pedestres. Pode-se identificar uma relação de dependência entre os elementos que compõem a simulação que pode ser empregada no estabelecimento de novos padrões de segurança.

Contextualizando a importância do aprimoramento de projetos de segurança e consequentemente a liberação de obras destinadas a uso público, pode-se destacar os preparativos para a Copa do Mundo, a ser realizada no Brasil, no ano de 2014. Os estádios indicados para a realização dos jogos serão cuidadosamente avaliados, sendo exigidos laudos de liberação por diversos órgãos, tais como Corpo de Bombeiros, Crea's, Polícia Militar, Vigilância Sanitária e vistorias pela Polícia Federal, a fim de verificar dados técnicos relacionados à integridade física. Os peritos verificarão o posicionamento geométrico das saídas, portões, rampas, saídas de emergência, entre outros fatores técnicos e estruturais que encontram-se associados ao tripé que sustenta o sucesso da prestação de serviços: segurança, conforto e custo.

Devido à grandiosidade do evento e sua repercussão mundial o nosso país,

sede desta Copa, deve priorizar todos os setores relacionados à segurança, fornecendo um ambiente propício e estruturado, sob o ponto de vista espacial, social e físico, suprimindo todas as possíveis exigências. Dessa forma, o emprego de simulações computacionais pode ser empregado conjuntamente, explicitando a importância na associação entre questões técnicas e computacionais na manutenção da integridade física, conforto, segurança e qualidade dos bens descritos na avaliação e liberação de ambientes destinados ao uso público.

1.5 LIMITAÇÕES

Tratando-se de um trabalho que envolve a aplicação de simulações computacionais, as conclusões obtidas submetem-se ao erro amostral e numérico na manipulação dos dados. As generalizações são tomadas por meio da análise individual do comportamento dos pedestres, padronizadas por meio dos parâmetros incluídos no modelo, dessa forma, são desconsideradas possíveis interferências individuais, mentais ou físicas, nas decisões dos pedestres. Como na análise de tais comportamentos, definir a intenção de um pedestre face a sua vulnerabilidade é difícil de ser expressa numericamente, a aplicação é restrita para situações de evacuação sem pânico, no qual a avaliação comportamental ainda é mais complexa.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresenta-se estruturado em cinco capítulos, sendo que o primeiro contém uma breve introdução, os objetivos, a justificativa e as limitações encontradas em seu desenvolvimento.

No capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica referente aos conceitos de arquitetura, normas e regras para edificação e caracterização de salas de cinema. Em seguida, é realizado um levantamento sobre os conceitos numéricos, métodos e técnicas estatísticas utilizadas para solucionar o problema proposto.

No capítulo 3 encontra-se estruturado o processo de modelagem e formulação do algoritmo.

No capítulo 4 são apresentados os resultados e análises obtidas por meio de simulações.

E, finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões e algumas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A fim de compreender o desenvolvimento e a aplicação da pesquisa há necessidade de identificar os principais conceitos que serão utilizados na formulação e validação dos resultados. A seguir serão apresentadas descrições históricas sobre o contexto no qual se dá a aplicação do estudo, seguida pela exposição das principais técnicas e métodos utilizados na pesquisa.

2.1 UMA BREVE HISTÓRIA DO SURGIMENTO DO CINEMA NO MUNDO E NO BRASIL

A preocupação em comprovar o desenvolvimento da comunicação como uma forma da expressão humana pode ser verificada ao longo da história. Provavelmente foi inicializada com a utilização da pintura e do desenho como representações de particularidades dinâmicas em cavernas, templos ou demais construções, por exemplo. Posteriormente, a utilização de fotografias e a manipulação das imagens foram características que marcaram o processo de evolução, objetivando captar o movimento e adaptá-lo à melhor forma de apresentação. Sendo assim, vários aparelhos foram idealizados e aperfeiçoados de modo a garantir a exibição do movimento, tais como o Fenacístoscópio, o Praxinoscópio, o Fuzil fotográfico, a Cronofotografia, o Cinetoscópio e o Cinematógrafo, específicos do aperfeiçoamento cinematográfico (ARAUJO, 2008).

O Cinematógrafo, último aparelho estruturado, criado pelos irmãos Lumière com caráter científico, possibilitou a exibição de um filme pela primeira vez. Projetado publicamente em uma tela, no ano de 1895, apresentava documentários de curta metragem, sendo destaque como o meio de expressão de maior impacto da era moderna. Inicialmente mudo, o cinema contava apenas com a narração e a mostração.

A intenção principal era despertar o interesse dos espectadores por fatos irreverentes, mas não necessariamente a estruturação de uma história. Por isso, a duração máxima dos principais trabalhos era de aproximadamente 10 minutos. Porém, somente no ano de 1903 que o cinema obteve maior repercussão, quando o americano Edwin S. Porter exibiu o primeiro filme de ação, disseminando o cinema no cenário cultural (MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES, 2009). As instalações eram simples e teatrais, nas quais os personagens deveriam ser responsáveis pelo posicionamento na imagem, já que as câmeras eram fixas e, enquadravam o cenário completo (RAMOS, 1987; MASCARELLO, 2006).

A década de 30 representa um período importante na história do cinema. Além de marcar o início do cinema falado, atribui ao cinema um caráter de evento social, marcando o apogeu da indústria cinematográfica, já que foi cenário de encontro da burguesia. Porém, a plenitude foi alcançada somente no período anterior a segunda grande guerra, ocorrida em meados do século XX.

Considerada a Sétima arte, o cinema possui influências além da produção de espetáculos, pois atua como um veículo de propaganda, de informação e de formação. Esta vertente do cinema advém da exigência de que a evolução sistemática do homem impõe à arte para que explique ao próprio ser humano as determinantes dos seus princípios evolutivos (BRANCO, 2005).

Acompanhando o desenvolvimento mundial do cinema, o cinematógrafo chega então ao Brasil no século XIX, com o cineasta e imigrante italiano Affonso Segretto, que juntamente com seus irmãos foram os precursores do cinema no país. A primeira exibição de cinema no Brasil aconteceu em 1896, no Rio de Janeiro, por iniciativa do belga Henri Paillie, em uma sala alugada do “Jornal do Commercio”, onde foram projetados oito filmetes de cerca de um minuto cada. Cerca de um ano depois, surgiu a primeira sala fixa de cinema, denominada “Salão de Novidades Paris” (REBOUCAS, 2008).

Exibições de filmes de caráter regional, mitos e credences brasileiras desta-

cam as sofisticações da linguagem cinematográfica no país. O século XX é marcado por centenas de pequenos filmes produzidos e exibidos para platéias urbanas que, em franco crescimento, demandavam lazer e diversão. Com o público atraído a esta nova arte, tornava-se necessário criar ambientes também sofisticados, baseado nas grandes produções estrangeiras. Cria-se então o chamado estúdio Vera Cruz, conhecido como o mais importante estúdio cinematográfico brasileiro da década de 50 (RAMOS, 1987).

Associado a evolução dos aspectos tecnológicos e práticos de execução das filmagens, as salas de cinemas também sofreram adaptações, sendo caracterizadas por exposições em locais abertos até luxuosas instalações, que buscam cumprir normas e regras técnicas de construção e liberação. A preocupação inicial consistia em adaptar o projetor e o ecrã¹, mas com o aumento das dimensões espaciais e técnicas de projeção, novos locais com formas especiais são exigidos. Pode-se observar, na figura 3, duas estruturas de cinema próprias da época, sendo notória suas adaptações e modernidades, disponíveis como imagens na internet.



(a) Século XIX



(b) Século XX

FIGURA 2: Instalações externas de cinemas dos séculos XIX e XX, respectivamente

Associado a evolução histórica, características envolvendo a demanda e outros investimentos também são relevantes. De acordo com o anuário de estatísticas culturais, divulgado no ano de 2009, o Brasil possuía 2098 salas de cinema distribuídas em maior número na região sudeste (1244), sendo São Paulo responsável por 34% de todo o cenário brasileiro. Quanto a região Sul do país, encontrava-se na se-

¹ Espaço físico livre situado entre a tela e a primeira fileira de poltronas.

gunda colocação, tendo o Paraná 34,75% das salas de cinema da região (Ministério da Cultura, 2009). Há uma demanda média de 100 milhões de ingressos anuais, dos quais entre 15% e 20% são para filmes brasileiros. A produção nacional tem mantido uma média de 90 a 100 filmes de longa-metragem por ano, sendo que nem todos conseguem lançamento comercial.

2.2 ARQUITETURA

Dentre as diversas questões que envolvem um projeto arquitetônico destaca-se a importância da criação de espaços adequados às atividades humanas. Nesse contexto Dias (2011) define arquitetura como a arte ou técnica de projetar e edificar o ambiente habitado pelo ser humano, sendo resultado de ciências exatas para servir e preencher expectativas, condicionantes ambientais, interesses e peculiaridades dos ambientes. Dentre tais peculiaridades, destacam-se o urbanismo, o paisagismo e diversas formas de design, que muitas vezes visam minimizar gastos referentes a futuros reparos.

Nesse sentido, para realizar a modelagem de objetos ou cenários é necessário conhecer medidas básicas e/ou mínimas para o ambiente proposto. No campo arquitetônico destaca-se Neufert e Neufert (2004), utilizado em projetos que podem ser ampliados para a modelagem tridimensional. Exibe proporções corretas e de forma sistemática referentes à princípios, normas e regulamentos sobre projetos e construções.

Como os objetos e ambientes possuem regras específicas de metragem, a seguir será realizada uma breve exposição dos principais parâmetros abordados e considerados durante a modelagem do problema, referentes à uma sala de cinema.

2.2.1 Normas geométricas para salas de cinemas

O projeto de salas de cinemas envolve a determinação de uma série de fatores, sejam espaciais, físicos ou técnicos. A fim de limitar os parâmetros utilizados na

modelagem serão abordadas as regras referentes às disposições espaciais, tais como metragens do espaço, corredores, poltronas, portas e saídas.

De acordo com Neufert e Neufert (2004) todos os lugares (cadeiras ou poltronas) devem ser fixos, com assentos rebatíveis (automático) com medidas dadas em centímetros conforme apresentado na figura 4.

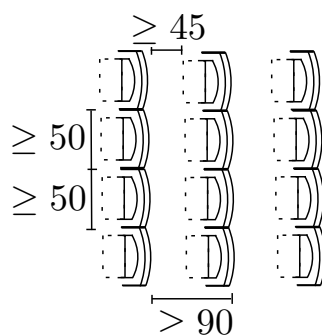


FIGURA 3: Dimensões das poltronas

FONTE: Neufert e Neufert (2004), adaptado

As dimensões para corredores e saídas são proporcionais a lotação do ambiente. Para a disposição geométrica considerada, as dimensões mínimas podem ser verificadas por meio da figura 5.

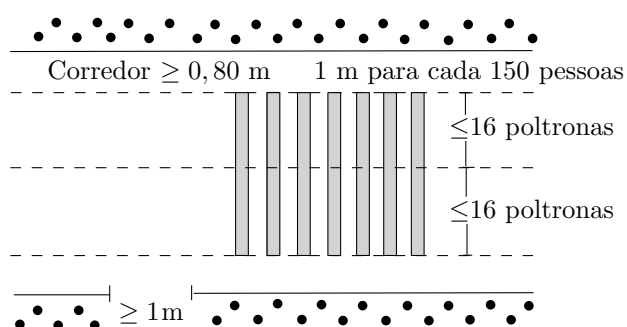


FIGURA 4: Relação entre largura dos corredores, saídas e lotação

FONTE: Neufert e Neufert (2004), adaptado

Considerando a área de movimentação de piso, de uso variável e flexível, adota-se como preferência a proporção espacial de 1:1,6, permitindo por sua vez, possíveis aproximações de topografia. Algumas das variantes para a área de movimentação, para o caso de teatros, encontram-se destacadas na figura 6 que, por sua

vez, podem ser extendidas e adaptadas ao caso dos cinemas.

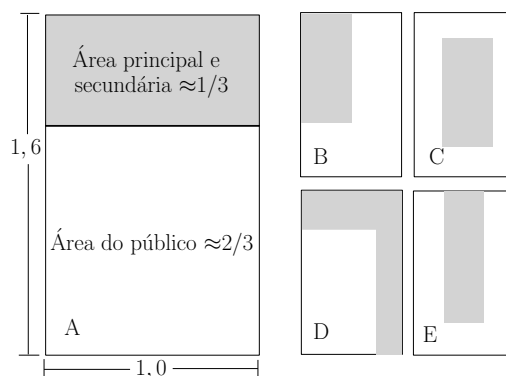


FIGURA 5: Variantes topográficas entre as áreas principal e do público

FONTE: Neufert e Neufert (2004), adaptado

A modelagem de um ambiente deve ser cuidadosamente avaliada, de forma a garantir segurança, confortabilidade e adequação de acordo com os princípios a ele destinados. Dessa forma, questões específicas relacionadas à segurança devem ser estabelecidas.

2.3 NORMAS DE SEGURANÇA

Dentre as normas que integram a liberação e fiscalização de obras, serão estruturados a seguir dados referentes à norma brasileira ABNT NBR 9050, aos critérios verificados na vistoria de obras pelo Corpo de Bombeiros e os aspectos do Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Estado do Paraná (CREA-PR), abordados conjuntamente em Fernandes (2010).

2.3.1 Norma Brasileira ABNT NBR 9050

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o Fórum Nacional de Normalização, cujo conteúdo é de responsabilidade dos Comitês Brasileiros (ABNT/CB), dos Organismos de Normalização Setorial (ABNT/ONS) e das Comissões de Estudo Especiais Temporárias (ABNT/CEET). A ABNT NBR 9050 foi elaborada no Comitê

Brasileiro de Acessibilidade (ABNT/CB40), pela Comissão de Edificações e Meio, no ano de 2004.

Esta norma trata da acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos, proporcionando a utilização segura do ambiente, seja referente a questões quantitativas ou qualitativas, apresentando critérios de acessibilidade visando o deficiente físico. Para o fator pessoa em cadeira de rodas o módulo de referência de área espacial é dado pela projeção de 0,80 m \times 1,20 m no piso, conforme observado por meio da figura 7.

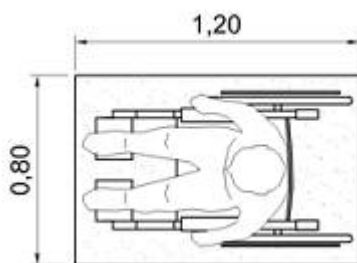


FIGURA 6: Dimensões do módulo de referência para pessoa em cadeira de rodas

FONTE: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004)

Ambientes como cinemas, teatros, auditórios e similares, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) devem ter espaço reservado para pessoas em cadeiras de rodas (P.C.R.), assentos para pessoas com mobilidade reduzida (P.M.R) e pessoas obesas (P.O.). Tais assentos devem garantir acessibilidade, conforto e igualdade de direitos e vantagens quando comparado aos demais locais não reservados. O número de assentos específicos a tais circunstâncias devem ser definidos conforme dados apresentados na tabela 1, estabelecidos a partir da lotação inicial máxima.

TABELA 1: Espaços destinados a P.C.R., P.M.R. e P.O., respectivamente

Capacidade total de assentos	Espaços para P.C.R.	Assento para P.M.R.	Assento para P.O.
Até 25	1	1	1
De 26 a 50	2	1	1
De 51 a 100	3	1	1
De 101 a 200	4	1	1
De 201 a 500	2% do total	1%	1%
De 501 a 1 000	10 espaços, mais 1% do que exceder 500	1%	1%
Acima de 1 000	15 espaços, mais 0,1% do que exceder 1 000	10 assentos mais 0,1% do que exceder 1 000	10 assentos mais 0,1% do que exceder 1 000

FONTE: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004)

Entre os critérios voltados a disposição espacial, existem as dimensões que devem ser reservadas especificamente às pessoas identificadas na tabela 1. Para o caso de pessoas em cadeiras de rodas, as dimensões encontram-se apresentadas na figura 8.

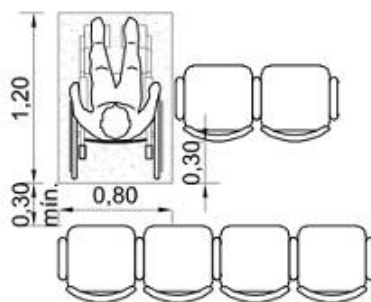


FIGURA 7: Espaço reservado para P.C.R. na primeira fila, por exemplo

FONTE: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004)

Além de tais metragens, o ambiente deve proporcionar algumas disposições gerais pré-definidas, tais como: acessibilidade, adaptabilidade, facilidade de circulação e mobilidade, garantindo a igualdade de locomoção e conforto.

2.3.2 Órgãos responsáveis pela fiscalização e liberação de obras: características observadas

O Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná (CREA-PR), tem por objetivo geral realizar a fiscalização, controle, orientação e aprimoramento de atividades profissionais em diversos ramos, tais como Engenharia, Arquitetura, Agronomia, Geologia e Meteorologia, protegendo a sociedade de possíveis danos que possam vir a ocorrer na execução do objeto fiscalizado (Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná, 2011).

A legislação determina e os CREAs procuram fiscalizar o correto cumprimento desta, por meio de profissionais habilitados, aptos a oferecer à sociedade um acompanhamento conveniente e tecnicamente eficaz. Trata-se de um órgão de fiscalização na forma de autarquia pública, de esfera estadual, que realiza as fiscalizações no estado, sob primeira e segunda instâncias, sujeito à deliberações e regulamentações do Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia (CONFEA). O CONFEA é um conselho de fiscalização profissional, responsável pela regulamentação e julgamento final no Brasil das atividades relacionadas às áreas propostas pelo CREA, na área de Engenharia em âmbito geral (Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia, 2004).

Associado às regulamentações do CREA, há inspeção das obras públicas pelo Comando do Corpo de Bombeiros. No Paraná as vistorias do Corpo de Bombeiros são regulamentadas pelo Decreto de Lei nº 13976 de 26/12/2002, o qual criou o Fundo Estadual do Corpo de Bombeiros Militar do Paraná, com a finalidade de prover recursos para aplicação em despesas correntes e de capital nas ações administrativas e operacionais do Corpo de Bombeiros (Comando do Corpo de Bombeiros, 2002).

A fiscalização e vistoria pelo Comando do Corpo de Bombeiros deve ser realizada em edificações novas, reformadas ou ampliadas, com área excedente a 100 m² e também para a liberação do “Alvará de Funcionamento”, de estabelecimentos comerciais, industriais, prestadores de serviços e residenciais multifamiliar, emitidos

pela Prefeitura Municipal, de acordo com a lei nº 11.095/2004. Além disso, as vistorias também podem ser realizadas nos casos de riscos iminentes de acidentes.

Com o objetivo de atender as Normas Brasileiras em vigor, as exigências preventivas do Corpo de Bombeiros e as posturas municipais que visam à segurança de pessoas e bens, o Capitão Ivan Ricardo Fernandes, integrante do Corpo de Bombeiros do Paraná propôs o livro “Engenharia de segurança contra incêndio e pânico” em conjunto com o curso de Engenharia de Segurança Contra Incêndio e Pânico, com o intuito de possibilitar aos profissionais habilitados os conhecimentos necessários para que possam gerenciar, projetar, bem como atuar em situações que envolvam sistemas preventivos contra incêndio e pânico (FERNANDES, 2010).

Fernandes (2010) apresenta as classificações que envolvem os conceitos relacionados a: Segurança Contra Incêndio e Pânico, Isolamento de Risco de Edificações, Carga de Incêndio das Edificações, Tramitação de Projetos, Saídas de Emergência, Escadas Enclausuradas, Sistemas preventivos, Central de gases e Vistorias contra incêndios. Em meio a tais temas, apresenta classificações quanto à ocupação, altura e características construtivas, dimensionamento das saídas, definição do número de saídas e as distâncias máximas a serem percorridas nos ambientes definidos, que encontram-se estruturados a seguir.

2.3.2.1 Classificações quanto à ocupação, altura, saídas e características construtivas

As características da ocupação de um ambiente, diferem-se à medida que são destinadas a públicos específicos. Nesse sentido, de acordo com Fernandes (2010), as classificações para ambientes destinados a locais de reunião ou concentração de pessoas definem-se como locais de código F, conforme verificado no quadro 1.

F	Locais de reunião	F-1	Locais onde há objetos de valor inestimável	Museus, galerias de arte, arquivos, bibliotecas e assemelhados.
		F-2	Templos e Auditórios	Igrejas, sinagogas, templos e auditórios em geral.
		F-3	Centros Esportivos	Estádios, ginásios e piscinas cobertas com arquibancadas, arenas em geral.
		F-4	Estações e terminais de passageiros	Estações rodoferroviárias, aeroportos, estações de transbordo e outros.
		F-5	Locais para produção e apresentação de artes cênicas	Teatros em geral, cinemas, óperas, auditórios de estúdios de rádio e televisão e outros.
		F-6	Clubes sociais	Boates e clubes noturnos em geral, salões de baile, restaurantes dançantes, clubes sociais e assemelhados.
		F-7	Construções provisórias	Circos e assemelhados.
		F-8	Locais para refeições	Restaurantes, lanchonetes, bares, cafés, refeitórios, cantinas e outros.

QUADRO 1 - Classificação quanto à ocupação

FONTE: Fernandes (2010)

Pode-se verificar que tais classificações são associadas às características do público e do ambiente. A classificação quanto à altura, define os ambientes em edificações térreas, baixas e de média alturas, designadas alfabeticamente e apresentados por meio do quadro 2.

Classificação da edificação quanto à altura	Considerações
K – Edificações térreas	Altura contada entre o terreno circundante e o piso da entrada igual ou inferior a 1,00 m.
L – Edificações baixas	$H \leq 6,00$ m
M – Edificações de média altura	$6,00 \text{ m} < H \leq 12,00$ m.

QUADRO 2 - Classificação quanto à altura

FONTE: Fernandes (2010)

A fim de verificar a resistência das obras quanto à propagação de fogo e possíveis adaptações, os ambientes seguem características específicas, definindo assim

os princípios do ambiente. Tais classificações encontram-se estruturadas no quadro 3.

CÓDIGO	TIPO	ESPECIFICAÇÃO	EXEMPLOS
X	Edificações em que a propagação do fogo é fácil.	Edificações com estrutura e entrepasso combustíveis	Prédios estruturados em madeira, prédios com entrepasso de ferro e madeira, pavilhões em arcos de madeira laminada e outros.
Y	Edificações com mediana resistência ao fogo.	Edificações com estrutura resistente ao fogo, mas com fácil propagação de fogo entre os pavimentos.	Edificações com paredes-cortinas de vidro; edificações com janelas sem peitoris; lojas com galerias elevadas e vãos abertos e outros.

QUADRO 3 - Classificação quanto às características construtivas

FONTE: Fernandes (2010)

Por fim, relacionado às saídas dos ambientes, estas devem obedecer a uma dimensão mínima de medida, referente ao somatório de todas as saídas do local. Tal medida pode ser estabelecida por meio da fórmula:

$$N = \frac{P}{C}, \quad (1)$$

onde P representa o valor da população, C o coeficiente de acessos e descargas e o valor de N representa o número total de unidades de passagens que devem ser satisfeitas, de modo a atender a população e as condições de acessos e descargas. O número de acessos e descargas é dado conforme a área destinada a cada pedestre e ao tipo de classificação do grupo, sendo apresentados na tabela 2.

TABELA 2: Classificação quanto às características de largura das saídas do Grupo F

Divisão	População	Acessos e Descargas	Escadas e rampas	Portas
F-1	Um pedestre por 3 m ² de área	100	75	100
F-2 F-5 F-8	Um pedestre por m ² de área	100	75	100
F-3 F-6 F-7	Dois pedestres por m ² de área	100	75	100

FONTE: Fernandes (2010), adaptado

A população é definida por meio da análise da área ocupada no ambiente, ou seja, 1 ou 2 pedestres por m², para o tipo de ambiente analisado.

2.3.2.2 Associação Brasileira de Cinematografia - ABC

A associação Brasileira de Cinematografia - ABC, é uma associação civil sem fins lucrativos fundada no ano de 2000. É formada por profissionais da área da cinematografia e da fotografia que visam a troca de informações e aperfeiçoamento das características designadas ao meio. Tais relações são possibilitadas por meio de discussões ou publicações de questões técnicas associadas as projeções em conjunto com a Agência Nacional do Cinema - ANCINE, que é um órgão oficial do governo federal do Brasil.

Para garantir a qualidade da imagem percebida pelos espectadores, a ABC estipula algumas metragens relacionadas às distâncias da tela às poltronas mais próximas, que por sua vez dependem do tamanho da tela. Emery (2011) apresenta algumas recomendações técnicas para salas de exibição cinematográfica, dentre as quais destacam-se:

1. A distância mínima (D_{min}) entre a tela de projeção e a poltrona mais próxima a ela deve ser igual ou, preferencialmente, superior a 60% da largura (L) da tela no formato 1:2,35, ou seja, $D_{min} = L \times 0,6$;
2. A distância máxima (D_{max}) entre a tela de projeção e face anterior do encosto da poltrona mais afastada da tela deve ser igual ou, preferencialmente, inferior ao dobro da largura (L) da tela de projeção, sendo aceitável que a distância máxima (D_{max}) seja igual ou, preferencialmente, inferior a 2,9 vezes a largura (L) da tela, sendo $D_{max} = L \times 2,0$ (recomendado) e $D_{max} = L \times 2,9$ (aceitável).

Tais normas podem ser visualizadas em conjunto na figura 8.

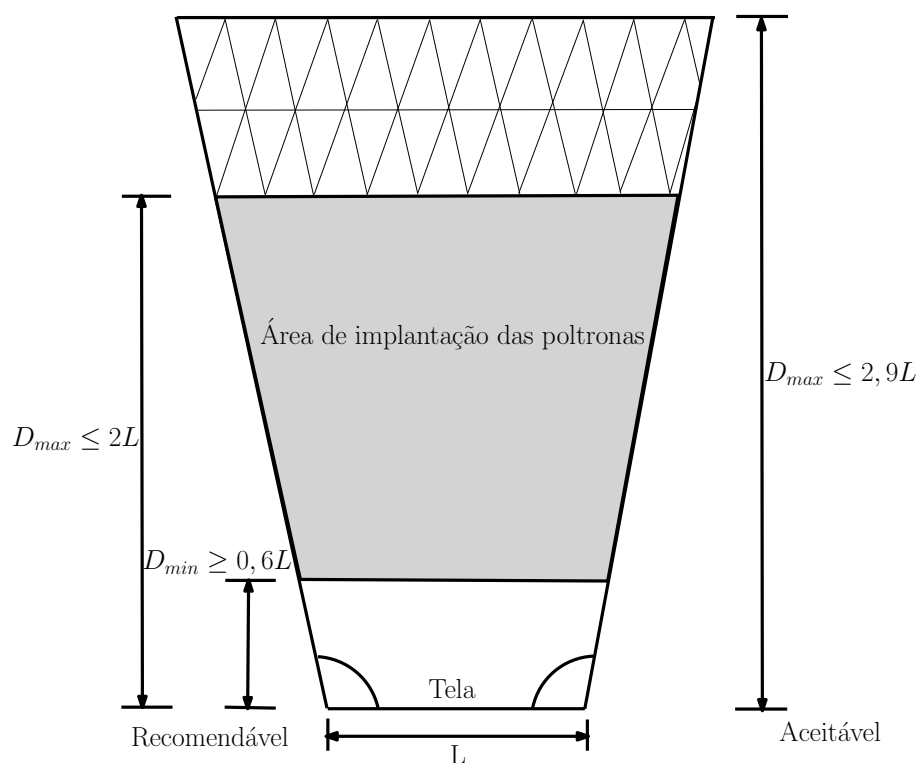


FIGURA 8: Área de implantação de poltronas: distâncias máxima e mínima

FONTE: Emery (2011), adaptado

2.4 MODELOS PARA REPRESENTAÇÃO DE PEDESTRES

O movimento ou trajeto descrito por um pedestre pode ser influenciado por características físicas ou mentais, que por sua vez, são únicas. Por outro lado, aspectos espaciais também podem direcionar o fluxo, ou pelo menos, obrigar a um novo comportamento. Obstáculos inesperados, qualidade da via e outros pedestres, são fatores que podem levar a uma diminuição da velocidade, desvio de rota ou até mesmo interrupção do movimento.

Partindo da análise de decisões individuais ou em grupo, pode-se verificar algumas características que tendem a uma regularidade de movimento, com determinada precisão. Para descrever o comportamento do fluxo de pedestres em determinadas situações torna-se necessário considerar algumas decisões por meio de regularidades, tomadas como suposições iniciais (ZAMPIERI; RIGATTI; DIÓGENES, 2007; LARRÃNAGA, 2008).

Diversos modelos destacam características observadas por meio da análise do fluxo de pedestres, destacando relações entre os mesmos e o ambiente. Muitas vezes, a definição das formas de interação são dadas a partir de regras espaciais e matemáticas, que possibilitam a variação e adaptação dos parâmetros na evolução dos modelos.

O estudo do fluxo de pedestres vêm tendo destaque nas últimas três décadas. Os modelos desenvolvidos relacionam-se a engenharia de transporte, muitas vezes fazendo analogias a outros sistemas e comportamentos, tais como fluxo de veículos, gases e fluidos (ZAMPIERI, 2006; HELBING, 1998). Nesse sentido, diversas caracterizações são definidas e permitem a aplicação nos mais diversos campos, de acordo com as especificações e direcionamento metodológico a que são tratadas.

2.4.1 Modelos relacionados a avaliação do fluxo de pedestres

Uma das formas de compreender um determinado fenômeno é buscar descrevê-lo por meio de um modelo. Independentemente da sua forma de representação, o modelo objetiva descrever uma realidade, possível pela observação e abstração deste fenômeno. Nesse sentido, diversos modelos foram desenvolvidos com o intuito de compreender e estruturar o comportamento do fluxo de pedestres. Porém, quando se analisa a trajetória da caminhada de um pedestre, deve-se considerar os fatos que influenciam na sua tomada de decisões.

Dentre tais fatores destacam-se aspectos espaciais, físicos, mentais e comportamentais que variam de pedestre a pedestre. Esse é um dos problemas que dificultam a elaboração de modelos que buscam descrever o comportamento do fluxo de pedestres, visto que há dificuldade em contemplar todas as possíveis atitudes de um pedestre. Por meio do entendimento de certos parâmetros que influenciam ou caracterizam a tomada de decisão dos pedestres, em situações gerais, pode-se assumir que no desenvolvimento do modelo, há regularidade em certas decisões (ZAMPIERI; RIGATTI; DIÓGENES, 2007).

Quanto às suposições e teorias utilizadas nas formulações há diferentes sistematizações para a modelagem dos fenômenos. Dessa forma, os modelos destacam características que permitem a sua classificação em grupos, sendo estes apresentados a seguir, conforme exposto em Zampieri (2006) e fundamentadas por Amâncio e Sanches (2005), Jiang e Claramunt (2002), Was (2010), Helbing (1998) e Kulakowski, Was e Topa (2010):

(a) Modelos de simulação

Modelos de simulação objetivam analisar o comportamento do fluxo de pedestres, em escala microscópica, e as possibilidades de escolha no traço de rotas, sejam relacionadas a questões de evacuação ou emergenciais. Entre tais métodos destacam-se: modelos de espera, de transição, estocásticos e de escolha de rotas.

Modelos de espera são utilizados para descrever o comportamento e movimentação dos pedestres quando estes são vistos como nós, sob os quais são incluídos tempos de espera aleatórios que variam segundo parâmetros do espaço. Utiliza-se como base de processamento as Cadeias de Markov, na qual cada pedestre é considerado isoladamente e, por meio de interações fornecem resultados associados ao fluxo.

Modelos de transição são semelhantes aos modelos de espera, porém avaliam nós e ligações. O movimento entre os nós depende do tipo de ligação e, encontra-se relacionado a densidade, distâncias mínimas percorridas e área do ambiente a que a simulação foi aplicada.

Modelos estocásticos sistematizam relações entre grupos de pedestres, expressando-as por meio de uma equação de complexa solução, seja analítica ou computacional. Por sua vez, são realizadas analogias com outros sistemas, tais como o comportamento de gases, que permitem a ligação entre diversos setores presentes no ambiente.

Modelos de rotas tratam-se basicamente de um problema de otimização, no qual busca-se minimizar a distância e maximizar os benefícios de um pedestre no

traço de uma rota. Dessa forma, são avaliados os obstáculos, suas dificuldades e a validade de rotas alternativas em função dos obstáculos, buscando a melhor entre elas.

(b) Modelos de base física

Os modelos de base física são relacionados à cinemática de gases e fluidos. Tal comparação permite definir a dinâmica do comportamento humano, por meio do comportamento de partículas dos gases, fornecendo parâmetros associados a velocidade constante e variantes ao modelo. Busca descrever as interações entre os pedestres e suas intenções mediante a tomada de decisão, por sua vez, geralmente necessitam de muitas correções e calibrações, o que pode tornar o modelo complexo na sua formulação e inviável economicamente.

(c) Modelos de nível de serviço

Modelos de nível de serviço destinam-se a avaliar a qualidade dos bens envolvidos numa simulação, tais como a qualidade do ambiente e das vias. Dessa forma, diferentemente dos outros modelos apresentados, visa suprir a segurança e conforto dos pedestres no traço de sua trajetória, independentemente de suas qualidades ou limitações físicas.

(d) Modelos configuracionais

Modelos configuracionais destacam-se pela simplicidade de sua aplicação. Pré-supõem que o fluxo de pedestre é uma consequência dos efeitos sociais e não, necessariamente, dos efeitos espaciais. Questões associadas ao fluxo de pedestres são relacionadas a análise da malha urbana, na qual as posições são definidas num sistema hierárquico e as movimentações são relacionadas à distância entre os espaços formados. Tem por objetivo primordial verificar o processo de formação dessa malha, do ponto de vista morfológico e como tais relações interferem no processo de evolução da sociedade e dos assentamentos urbanos.

(e) Modelos Multiagentes

Modelos multiagentes tem como vantagem a capacidade de simular individualmente e independentemente os pedestres, de forma a garantir sua interação com os demais pedestres e com o ambiente. Além disso, por meio de uma programação orientada a objeto, os pedestres podem ser considerados como classes, sob as quais, as interações também podem ser estimadas. Por outro lado, a inclusão de parâmetros torna difícil a validação dos resultados.

(f) Modelos utilizando Autômato Celular

Nos modelos de pedestres que utilizam autômato celular o espaço é designado por meio de uma grade regular, cujas células seguem uma limitação determinada. Os estados das células são determinados ou modificados segundo regras ou funções, definidos por meio da identificação do estado da simulação anterior associado ao estado das células vizinhas. São empregados em formulações dinâmicas cujas interações baseiam-se na evolução do tempo.

Esse modelo identifica o comportamento do fluxo por meio da identificação de características associadas aos pedestres, individualmente. Sendo assim, pode-se identificar a configuração da malha em intervalos de tempo, que definem o estado atual da malha na simulação. Por outro lado, as dificuldades de formulação do modelo encontram-se na definição dos elementos de transição, na regularidade da velocidade e na necessidade em utilizar elementos de diferentes tamanhos, já que as interações são realizadas numa malha regular.

2.5 AUTÔMATOS CELULARES

O interesse em verificar o comportamento evolutivo e interativo das espécies ao longo dos anos sempre foi marcado por inúmeras pesquisas e avanços científicos, a fim de determinar padrões de crescimento e autorreprodução por meio da utilização de sistemas numéricos aplicados à sistemas naturais. Nesse sentido, alguns cientistas destacaram-se devido a produtividade e influência posterior de suas pesquisas.

Nos anos 40, Stanislaw Ulam propôs um estudo sobre o crescimento de cristais, modelando-os sobre uma malha. Mais tarde, John von Neumann destacou a capacidade de simular a autorreprodução, adotando um modelo inicial de robô que era capaz de se replicar a partir de um conjunto de peças separadas. Essas são situações que descrevem a abordagem dos autômatos celulares sob o ponto de vista teórico (NEUMANN, 1996; TOFFOLI, 1987).

Como consequência da junção dos resultados, von Neumann deu origem a um modelo abstrato para o problema da replicação, conhecido historicamente como o primeiro autômato celular, denominado *universal copier and constructor*, baseado em uma malha bidimensional composta por células que poderiam estar em um conjunto de 29 estados. Mas, foi somente nos anos 70 que os autômatos celulares foram popularmente difundidos, sob o ponto de vista prático.

A partir do modelo proposto por John Horton Conway, *Game of life*, permitiu-se identificar como imagens complexas podem ser geradas a partir de simples modelos e regras que evoluem e interagem com o tempo (GREMONINI; VICENTINI, 2008). Devido a tal evolução histórica, considera-se que John Horton Conway deu origem às primeiras manifestações práticas dos autômatos celulares, dado que os estudos anteriores caracterizam-se por aspectos teóricos, que por sua vez, em muito contribuíram à estruturação do assunto.

Do ponto de vista metodológico, os autômatos celulares são utilizados na formação ou determinação de padrões comportamentais sociais, ambientais e biológicos, por meio da relação e interação dos fatores envolvidos. Trata-se de um modelo matemático discreto no tempo, nas variáveis dinâmicas e no espaço, modelado em uma grade regular de células, chamada malha, grade ou *grid*, cuja evolução é permitida pelo estabelecimento de regras simples de dependência entre elas que variam de acordo com os seus estados. O significado de discreto é que o espaço, o tempo e as propriedades do autômato celular podem ter apenas um finito e contável número de estados. Para os casos de análise de modelos dinâmicos contínuos são empregadas

as equações diferenciais parciais devido a sua capacidade de aplicação.

Os autômatos celulares contêm uma grande quantidade de componentes simples com interações locais que podem levar à produção de padrões complexos. Cada componente, chamado de célula ou elemento, é definido por meio de um conjunto de estados finitos, que evoluem segundo regras.

O estado de cada célula é atualizado a cada iteração, por meio da análise dos estados prévios da vizinhança, ou seja, das células mais próximas, que por sua vez, são caracterizadas em intervalos de tempo discretos. Consequentemente, à medida que o sistema evolui dinamicamente, emergem comportamentos complexos decorrentes dessas influências mútuas, caracterizando um sistema complexo (LIMA, 2007; GREMONINI; VICENTINI, 2008). Essa complexidade pode ser observada pelo comportamento dinâmico estocástico dos autômatos celulares, observada ao passo em que, há repetidas atualizações no estado das células, em intervalos de tempo discretos, satisfazendo as regras inicialmente propostas, sujeitos a aleatoriedade.

2.5.1 Caracterização de um autômato celular

A análise por meio dos autômatos celulares parte de seu elemento base: a célula. Funciona como uma unidade básica de armazenamento, que carrega um valor numérico que define seu estado. Nos casos de análises mais complexas, do ponto de vista numérico, as células podem ter valores distintos. O estado inicial de um autômato celular é definido pelo conjunto dos valores numéricos atribuídos as células que o compõem. A evolução dos autômatos é realizada por meio da interação dos estados das células, consequentemente, está diretamente associada as suas condições iniciais. Com base nisso, diferenças significativas no comportamento das interações podem ser causadas por pequenas perturbações nos estados iniciais.

As células são dispostas em um mesmo espaço n -dimensional caracterizado pela regularidade das células. O caso unidimensional é definido pela justaposição lateral das células, definindo uma espécie de linha com elas. Para os casos de aplicação

mais utilizados, destacam-se os casos uni e bidimensional.

Definidas as células no espaço é necessário verificar como é dada a sua evolução temporal, já que a análise *a priori* define características básicas, porém estáticas. Para tanto, define-se o tipo de vizinhança, ou seja, as células que tendem a influenciar na atualização da célula analisada, num determinado intervalo de tempo.

Para o caso bidimensional, existem geometrias típicas de células: quadrada, triangular e hexagonal (VIHER; DOBNIKAR; ZAZULA, 1998). Dentre os tipos de vizinhança para o caso bidimensional, para geometrias quadradas, destacam-se a de von Neumann ($r=1$), a de Moore ($r=1$ ou expandido) e Aleatório, conforme visualizado na figura 10, e a de Margolus, que tem por característica, considerar 2×2 células como única.

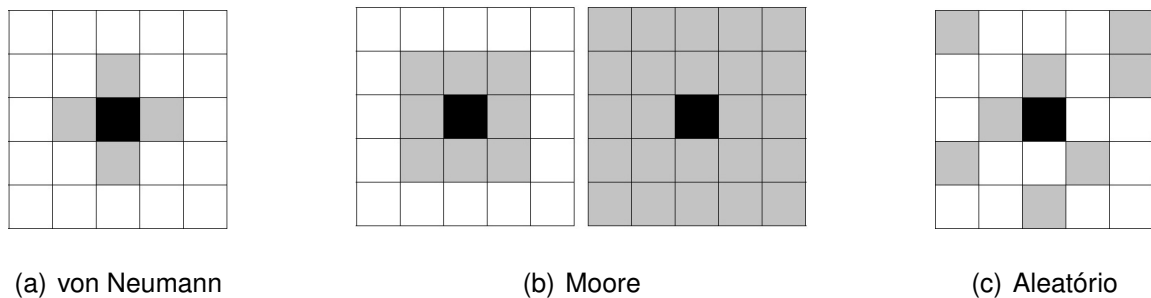


FIGURA 9: Tipos de vizinhança para o caso bidimensional

FONTE: A autora (2011)

Pode-se verificar que as vizinhanças distinguem-se pelo acréscimo de células adjacentes, diagonais ou com um maior raio. Analisando-se a figura 10, pode-se verificar que o estado da célula central, destacada na cor preto, é estabelecido pelo estado das células vizinhas, observadas na cor cinza.

2.5.2 Definição de autômato celular

De acordo com Lima (2007) denomina-se autômato celular ao conjunto (L, S, N, f) , no qual:

- L representa uma malha d -dimensional regular;

- S é um conjunto finito de estados;
- N determina a vizinhança, um conjunto finito, de tamanho $|N| = n$ e dimensão d , no qual $\forall c \in N, \forall r \in L; r + c \in L$;
- f é uma função de transição, $f : (S, N) \rightarrow S$.

Em outras palavras, L representa a discretização do espaço, S o número finito de estados que uma célula pode assumir, N a vizinhança que influencia na atualização do estado de uma célula, de tal forma que uma variação no raio determina uma região ainda pertencente à malha e f a regra que define o estado de uma célula a partir do seu estado atual e da vizinhança.

A partir da discretização em uma malha d -dimensional, obtêm-se células regulares que completam inteiramente o espaço formado. A topologia de cada célula deve atender geometricamente a delimitação de um polígono regular.

Dessa forma, é fundamental considerar alguns fatores, que influenciarão diretamente nas regras de interação, tais como: dimensões e geometria da malha, definição da vizinhança, condições de fronteira, condições iniciais ou estado inicial, o conjunto de estados possíveis e as regras de interação.

Chávez e Liang (2003) apresentam características fundamentais dos autômatos celulares, descritas por:

- Paralelismo: atualização simultânea dos estados das células;
- Localidade: O estado atual de uma célula depende da sua posição na iteração anterior e dos estados das células vizinhas;
- Homogeneidade: Valem as mesmas regras de interação entre as células, ou seja, há padronização na definição das possibilidades do movimento.

Considerando-se a regra de interação ou função de transição para células organizadas sobre uma malha bidimensional, Chávez e Liang (2003) definem a função de transição para o caso bidimensional por:

$$a_{i,j}^{(t+1)} = f \left[\sum_{m=-r_1}^{r_1} \sum_{n=-r_2}^{r_2} \alpha_{m,n} a_{i+m,j+n}^{(t)} \right] \quad (2)$$

onde $\alpha_{m,n}$ representa o peso de influência da célula $(i+m, j+n)$ na célula (i, j) , sujeita aos parâmetros r_1 (extensão horizontal) e r_2 (extensão vertical), e $a_{i,j}$ a atualização do estado, dada pelo somatório das células vizinhas.

A partir do conjunto de estados que uma célula poderá assumir são atribuídos os valores correspondentes a cada uma, o que definirá o estado inicial do problema, normalmente 0 ou 1. O resultado da simulação é dado pela atualização das interações e, conseqüentemente, dos estados das células.

A cada iteração a regra de transição f determina uma nova configuração na malha, $C_t : L \rightarrow S$ dada por $C_{t+1} = f(C_t)$, onde $C_{t+1}(r) = f(\{C_t(i) | i \in N(r)\})$. Tal regra é aplicada a cada passo da simulação e pela sua sensibilidade os estados finais podem ser caracterizados por grandes variações quando comparados ao estado inicial, justificando assim a complexidade dos resultados.

Após as contribuições de Ulam e von Neumann, em 1982, Stephen Wolfram verificou características da dinâmica estatística dos autômatos celulares e o processo de formação de padrões similares, estabelecendo dentre outros resultados, certas propriedades algébricas. Para Wolfram, os Autômatos Celulares podem ser considerados como uma idealização discreta das equações diferenciais parciais, frequentemente utilizadas para descrever sistemas naturais (GREMONINI; VICENTINI, 2008). Além disso, verificou que a complexidade dos autômatos celulares pode ser gerada, partindo de regras básicas, gerando um padrão de auto-organização e contribuindo de forma significativa para a formação espontânea de padrões (WOLFRAN, 2002).

Empiricamente, os autômatos celulares possuem quatro padrões de classificação espaço-temporais gerados após a evolução e definidos como:

- Classe 1: Autômatos cuja evolução conduz a um estado homogêneo, no

qual as células atingem um mesmo valor;

- Classe 2: Autômatos cuja evolução conduz a um estado periódico no tempo e não homogêneo, no qual nem todas as células tem um mesmo valor;
- Classe 3: Autômatos cuja evolução conduz a um estado caótico, quase não reconhecível;
- Classe 4: Autômatos cuja evolução conduz a um estado complexo e imprevisível, podendo propagar, criar ou aniquilar estruturas.

As contribuições de Wolfram comprovam a possibilidade de auto-organização e formação de padrões durante a evolução temporal dos autômatos celulares e, consequentemente, possibilitando a aplicação nos estudos de simulações computacionais.

2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O objetivo do desenvolvimento, aprimoramento ou da melhoria de atendimento na prestação de serviços são questões que norteiam objetivos comuns à diversas áreas, que por sua vez, encontram-se visam suprir e associar três elementos base: conforto, segurança e custo. Neste sentido, a simulação se destaca como uma poderosa ferramenta no desenvolvimento de sistemas mais eficientes e no apoio à tomada de decisão (SALIBY, 1999). No qual, o fato de estimar dados e prever resultados são fatores relevantes na experimentação e manipulação dos dados.

A simulação consiste num processo de experimentação pelo qual um modelo busca descrever mudanças na estrutura, no ambiente ou nas condições de contorno de um sistema (HARRELL et al., 2002). O modelo idealizado permite a replicação de um ambiente real, de forma a explicitar, *a priori*, possíveis modificações na estrutura real. Por essa razão, a veracidade dos resultados está relacionada em grande escala, com a exposição correta dos dados de entrada do modelo, assim como, das especificidades das variáveis.

O modelo que rege a simulação computacional tem por objetivo descrever de

maneira simplificada um sistema real, de forma que contenha todas as informações que caracterizam a simulação. De acordo com Moore e Weatherford (2005), os modelos se dividem em modelos físicos, analógicos e simbólicos. Como exemplos dos modelos simbólicos destacam-se: Modelos de Simulação, modelos algébricos e modelos de planilha, sendo de cunho mais abstrato, no qual as relações são definidas matematicamente.

Considerando-se a classificação dos modelos, como principais destacam-se os modelos determinísticos e os modelos probabilísticos/estocásticos (MOORE; WEATHERFORD, 2005; TAVEIRA, 1997; VIANA, 2003; BRESSAN, 2002; GREMONINI; VICENTINI, 2008; HARRELL et al., 2002). Os modelos determinísticos são ponderados por variáveis respostas bem definidas, inalteradas por quaisquer variantes, enquanto nos modelos probabilísticos ou estocásticos, há presença de variável aleatória. Dessa forma, a definição do modelo a ser utilizado está diretamente relacionado ao tipo de problema modelado.

De acordo com Montevechi, Duarte e Nilson (2003) e Briguenti (2006), com base nos resultados estabelecidos pode-se desenvolver resultados além dos oferecidos para a tomada de decisão, dado que possibilita-se a redução da experimentação e evolução dinâmica do modelo. Atua como uma alternativa que estima dados para inclusão e comparação de variáveis, conseqüentemente, estabelecendo resultados mais satisfatórios, sob o ponto de vista prático, para a fase de experimentação.

A explicação significativa do modelo deve atender as restrições e aproximações de parâmetros reais, o que na maioria dos casos, torna-se complexa. Por outro lado, quando são atendidos, os resultados são relevantes no processo de inferência e estimação. Com isso, destacam-se na literatura vantagens e desvantagens do emprego das simulações computacionais, esquematizadas a seguir.

Bressan (2002), Gavira (2003), Taveira (1997) e Muniz et al. (2002) destacam as principais vantagens do uso das simulações computacionais, sendo algumas dadas por:

1. Testes prévios de novas políticas, projetos, procedimentos e softwares, antes da implantação;
2. Capacidade em ajustar o tempo de processamento de um fenômeno;
3. Destacar as variáveis que tendem a influenciar e definir significativamente um modelo;
4. Analisar numericamente sistemas cuja resolução analítica torna-se complexa ou mesmo impossível;
5. Permitir manter um maior controle sob as condições dos experimentos durante o período de tempo simulado;
6. Processo de modelagem evolutivo, no qual o modelo vai aumentando a complexidade aos poucos;
7. Construção de consenso: com base em dados numéricos, o convencimento e apresentação dos resultados pode ser melhor embasada.

Em contrapartida, Bressan (2002), Gavira (2003), Taveira (1997) e Costa (2000) apresentam certas desvantagens ou riscos que podem caracterizar as simulações, como qualquer outro método sujeito à intervenções numéricas ou adaptativas.

1. Necessidade de treinamento associada ao alto custo computacional no desenvolvimento do algoritmo;
2. Interpretação errônea dos dados apresentados;
3. Convencimento da proximidade algébrica do modelo aos parâmetros reais;
4. Dificuldades na modelagem e interpretação dos resultados;
5. Precisão satisfatória.

Dessa forma, percebe-se que analisando as variáveis e definindo os parâmetros de acordo com as situações analisadas é possível formular um modelo que se aproxime do real e que viabilize o tempo de processamento técnico ao invés do manual, de forma a garantir precisão e otimização dos resultados.

2.7 MÉTODO DE MONTE CARLO

Os modelos probabilísticos de simulação fundamentam-se na análise do comportamento probabilístico das variáveis, de forma a identificar possíveis características na estrutura dos dados, por meio da utilização da estatística. Devido a sua natureza probabilística, pode-se dizer que os métodos probabilísticos tiveram sua origem a partir do Método de Monte Carlo.

O nome “Monte Carlo” surgiu na segunda guerra mundial, durante o projeto Manhattan, na construção da bomba atômica. Stanislaw Ulam, von Neumann e Fermi consideraram que tal método poderia ser empregado na simulação direta dos problemas de natureza probabilística (HAMMERSLEY; HANDSCOMB, 1964). A nomenclatura do método deve-se ao cassino de Monte Carlo, em Mônaco, utilizado em uma analogia a casualidade do resultado das roletas (ANDRADE; FRIZZONE; SENTELHAS, 2001).

Além de poder ser aplicado tanto a problemas com conteúdo não probabilístico quanto àqueles com estrutura probabilística, quando relacionado a outros métodos numéricos de aproximação, o Método de Monte Carlo destaca-se quanto a capacidade de precisão. Na avaliação da aproximação de n -pontos do espaço m -dimensional, produz um erro de estimação da ordem de $n^{-\frac{1}{2}}$, enquanto que a melhor aproximação para os demais métodos é da ordem de $n^{-\frac{1}{m}}$ (MULLER, 2008).

A definição do Método de Monte Carlo é apresentada por diversos autores na literatura. Hammersley e Handscomb (1964) definem o Método de Monte Carlo como a parte da matemática experimental que está preocupada em experiências com números aleatórios. De uma forma geral, o Método de Monte Carlo atua na análise de experimentos de forma a determinar propriedades da população a partir de uma nova amostragem aleatória, que estabelece novas componentes para tal população. Tais resultados são obtidos por meio de aproximações da função de interesse segundo uma distribuição de probabilidade, de forma a obter um resultado esperado, partindo

da análise de números aleatórios.

Com base nos princípios do Método de Monte Carlo, foram realizadas algumas modificações ou adaptações ao mesmo, possibilitando descrever novas aplicações. Algumas destas variações encontram-se em Muller (2008) e serão comentadas a seguir.

1. Simulação direta de Monte Carlo: Utilizada na modelagem do fluxo de fluidos cuja intenção é resolver a equação de Boltzmann, relacionada a análise de fenômenos de transporte;
2. Monte Carlo Cinético: Empregado na simulação de processos que ocorrem na natureza e, por sua vez, possuem certa taxa conhecida, a qual deve ser fornecida inicialmente no algoritmo;
3. Monte Carlo Quântico: Envolve uma grande classe de algoritmos que visam resolver um problema quântico n -dimensional.
4. Quase Monte Carlo: Muitas vezes empregado como substituto da distribuição uniforme de números aleatórios, envolvendo uma sequência de baixa discrepância. Ou seja, as sequências não envolvem números aleatórios ou quase-aleatórios, mas possuem propriedades associadas a alguma distribuição de probabilidade;
5. Monte Carlo com Cadeias de Markov: Relacionado a seleção de amostras de distribuições de probabilidade que são baseadas numa cadeia de Markov;
6. Localização por Monte Carlo: Utilizado na localização espacial, por exemplo, empregado em sensores e na robótica;
7. Otimização estocástica: Métodos de otimização que reúnem elementos aleatórios da função objetivo, do algoritmo ou em ambos, não necessariamente, buscando a solução exata do problema de forma determinística.

Dentre as diversas aplicações tem-se a Simulação de Monte Carlo. Sua intenção é reproduzir algum sistema real experimentalmente, principalmente quando

outras análises são matematicamente complexas. De acordo com Escudero (1973) esse método consiste na substituição de um sistema físico ou matemático por um modelo probabilístico, verificando processos por meio de amostras aleatórias ou números pseudo-aleatórios.

A obtenção de números aleatórios sintéticos é feita a partir de um intervalo entre 0 e 1. Para o caso de números aleatórios gerados por meio de computadores, são utilizados algoritmos que geram uma sequência de operações de modo a obter um número entre 0 e 1. Estes números são denominados pseudo-aleatórios (SCHEUNEMANN, 1995).

O Método de Simulação de Monte Carlo trata de um modelo de simulação que utiliza a geração de números aleatórios para atribuir valores às variáveis que se deseja investigar. Os números podem ser obtidos através de algum processo aleatório (tabelas, roletas, etc.) ou diretamente do computador, por meio de funções específicas (pseudo-aleatórios) podendo ser aplicado nos mais diversos campos (LUSTOSA; PONTE; DOMINAS, 2004). Na literatura especializada, destacam-se algumas das suas aplicações: desenhos de reator nuclear, cromodinâmica quântica, terapia de câncer por radiação, fluxo de tráfego, evolução estelar, sistemas de corpos interagentes e econometria.

2.8 INFERÊNCIA ESTATÍSTICA

Utilizando a inferência estatística é possível estabelecer indutivamente propriedades da população a partir dos dados referentes a uma amostra, sujeita a uma determinada precisão. Nesse sentido, as generalizações são realizadas a partir da análise das principais características dos dados e seu comportamento.

Os principais aspectos da inferência estatística utilizados na pesquisa, serão brevemente destacados a seguir.

2.8.1 Distribuição normal ou Gaussiana

A distribuição normal é amplamente utilizada na modelagem de dados, sendo conhecida como a mais importante das distribuições de probabilidade pelo fato de que para grandes amostras os resultados de muitas estatísticas, calculadas com valores oriundos de variáveis aleatórias com distribuição qualquer, são aproximados para uma distribuição normal, independente da distribuição de probabilidade da variável original. Esse resultado é garantido pelo Teorema Central do Limite², T.C.L., que estabelece que a distribuição das médias amostrais de somas de variáveis aleatórias será aproximadamente normalmente distribuída e tenderá a uma distribuição normal

à medida que o tamanho da amostra crescer, ou seja,
$$\frac{\sum_{i=1}^n X_i - E\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)}{\sqrt{V\left(\sum_{i=1}^n X_i\right)}} \xrightarrow{n \rightarrow \infty} N(0, 1).$$

A aproximação para a distribuição normal de soma de variáveis aleatórias melhora à medida que o tamanho amostral cresce, permitindo alguns procedimentos de inferência sem qualquer conhecimento da distribuição da população (PAES, 2009). Por meio da distribuição de normalidade, os dados são explicados pelos parâmetros média e desvio padrão, garantindo o cálculo de qualquer probabilidade associada à distribuição, por admitir uma distribuição simétrica. Com a aplicação de testes de normalidade pode-se verificar se a variável aleatória pode ser modelada por meio de uma distribuição normal (GUIMARÃES, 2008).

Associado ao Teorema Central do Limite, a Gaussianidade dos dados pode ser verificada por meio de uma análise descritiva, por exemplo: análise de histogramas, *box-plots*, distância entre média e mediana e coeficientes de assimetria e curtose, que medem, respectivamente, o grau de desvio ou afastamento da simetria e do achatamento da distribuição. Para análises consistentes, existem testes de

²Quando se tem uma sequência de variáveis aleatórias independentes X_1, X_2, \dots definidas no mesmo espaço de probabilidade e sendo S_1, S_2, \dots a sequência de somas parciais definidas por $S_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n$ então o TCL trata da convergência em distribuição da estatística $\frac{S_n - E(S_n)}{\sqrt{V(S_n)}}$ para uma distribuição normal $N(0, 1)$, ou melhor, $\frac{S_n - E(S_n)}{\sqrt{V(S_n)}} \rightarrow Z \sim N(0, 1)$ (JAMES, 1996).

hipóteses que avaliam a Gaussianidade dos dados, como por exemplo, os testes de Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling e Shapiro-Wilk, extremamente rigorosos quanto à suposição de normalidade (PAES, 2009).

Conforme expõem Leotti, Birck e Ribold (2011), os testes de Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov são baseados na função de distribuição empírica (FDE) dos dados. O teste de Kolmogorov-Smirnov pertence à classe suprema de estatísticas baseadas na FDE, pois trabalha com a maior diferença entre a distribuição empírica e a hipotética. O teste de Anderson-Darling pertence à classe quadrática de estatísticas baseadas na FDE, pois trabalham com as diferenças quadráticas entre a distribuição empírica e a hipotética. Tais testes encontram-se descritos a seguir, de acordo com Gujarati (2000), Paes (2009), Guimarães (2008), Leotti, Birck e Ribold (2011), Marques e Marques (2005), Chao (1974), Levine et al. (2005) e James (1996):

(a) Teste de Kolmogorov-Smirnov

O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov testa a hipótese nula H_0 contra a hipótese alternativa H_1 , ou seja,

$$\begin{cases} H_0 : \text{Os dados seguem uma distribuição normal,} \\ H_1 : \text{Os dados não seguem uma distribuição normal.} \end{cases} \quad (3)$$

Este teste estabelece a comparação da frequência acumulada dos dados, com a função de distribuição teórica, expressando-a pela diferença máxima absoluta entre a distribuição de frequência assumida $F(x)$ e a distribuição empírica $F_n(x)$, ou seja, $|F(x) - F_n(x)|$. A estatística do teste é dada a partir da distância máxima calculada, representada por:

$$D_n = \max_x |F(x) - F_n(x)|. \quad (4)$$

As distribuições de probabilidade definidas são dadas por $F(x_{(i)}) = P(X \leq x_{(i)})$ e pela função escada, caracterizada por

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \begin{cases} 1, & \text{se } x_{(i)} \leq x \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (5)$$

Como $F_n(x)$ é definida para valores menores ou iguais a x , pode ser reescrita como:

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x \leq x_{(1)} \\ \frac{k}{n}, & \text{se } x_{(k)} \leq x < x_{(k+1)} \\ 1, & \text{se } x > x_{(n)}. \end{cases} \quad (6)$$

Entretanto, tal função não é contínua em seu domínio, por isso, recorre-se a uma nova estatística D_n que determina a distância vertical entre as distribuições assumidas e a teórica, nos pontos x_{i-1} e x_i . A estatística do teste é dada então por

$$D_n = \max(D^+, D^-), \quad (7)$$

onde

$$D^+ = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_n(x_{(i)})| \quad (8)$$

$$D^- = \max_{x_{(i)}} |F(x_{(i)}) - F_n(x_{(i-1)})|. \quad (9)$$

Caso D_n seja maior que o valor crítico α , rejeita-se a hipótese de normalidade dos dados com $(1 - \alpha)100\%$ de confiança. Caso contrário, a hipótese de normalidade não é rejeitada.

(b) Teste de Anderson Darling

O teste de normalidade de Anderson-Darling é realizado por meio do teste de hipóteses estabelecido no caso anterior, expresso em (3). Aplica-se como estatística para o teste

$$A^2 = n \int_{-\infty}^{\infty} \frac{[F_n(x) - F(x)]}{F(x)(1 - F(x))} dF(x), \quad (10)$$

sendo $F_n(x)$ a função de distribuição acumulada empírica, dada por

$$F_n(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < x_{(1)} \\ \frac{k}{n}, & \text{se } x_{(k)} \leq x < x_{(k+1)} \\ 1, & \text{se } x \geq x_{(n)}. \end{cases} \quad (11)$$

De forma equivalente, a estatística pode ser escrita por

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i-1) \ln(F(x_{(i)})) + (2(n+1)+1) \ln(1-F(x_{(i)}))] \quad (12)$$

onde, a transformação leva a uma distribuição uniforme no intervalo $(0,1)$, resultando em

$$A^2 = -n - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(2i-1) \ln(U_{(i)}) + (2(n-1)+1) \ln(1-U_{(i)})] \quad (13)$$

Para uma distribuição com parâmetros conhecidos toma-se os valores da função de distribuição acumulada da estatística de A^2 , dada em (11), resultando na análise dos valores críticos do teste de hipóteses.

2.9 REGRESSÃO POLINOMIAL POR MEIO DO MÉTODO DE MÍNIMOS QUADRADOS

O Método dos Mínimos Quadrados é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste de um modelo a um conjunto de dados minimizando a soma dos quadrados das diferenças entre o valor estimado pelo modelo ajustado e os dados observados, ou resíduos (BERKELEY, 1971; BURDEN; FAIRES, 1988; SCHEID, 1991; MARQUES; MARQUES, 2005).

Por meio da análise do gráfico de dispersão, pode-se verificar uma tendência de relação funcional entre as variáveis consideradas. Se os pontos se aproximam de uma reta, sugere-se uma relação linear retilínea, assim como em outros casos

pode exprimir relações lineares: quadráticas e cúbicas, e não-lineares tais como a exponencial.

2.9.1 Ajustamento cúbico ou cúbica dos Mínimos Quadrados

Caso o modelo seja um polinômio de grau 3, tem-se uma relação cúbica entre a variável resposta y e a variável explicativa x na forma

$$y = \alpha + \beta x + \gamma x^2 + \delta x^3 + \varepsilon, \quad (14)$$

onde ε é o termo estocástico e α, β, γ e δ são os parâmetros do modelo estimados por $\hat{\alpha} = a, \hat{\beta} = b, \hat{\gamma} = c$ e $\hat{\delta} = d$. Então o modelo estimado tem a forma:

$$\hat{y} = a + bx + cx^2 + dx^3. \quad (15)$$

É importante citar que a parte sistemática do modelo $\alpha + \beta x + \gamma x^2 + \delta x^3$ é o que se pode modelar, pois a parte estocástica, ε , não permite isto.

De um modo geral, pode-se aplicar o tratamento matricial, o que facilita a obtenção dos parâmetros. Assim, seja o modelo com p variáveis

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \beta_{p-1} x_{ip-1} + \varepsilon_i \quad (16)$$

e se for observado n validações do modelo, $i = 1, 2, \dots, n$, pode-se escrever os resultados na forma matricial:

$$\underline{Y} = X\underline{\beta} + \underline{\varepsilon} \quad (17)$$

onde X é a matriz do modelo de ordem $n \times p$, \underline{Y} é o vetor dos valores observados da variável descrita com dimensão n , $\underline{\beta}$ é o vetor dos parâmetros com dimensão p e $\underline{\varepsilon}$ é o vetor dos erros de dimensão n . Assim, $X\underline{\beta}$ é a parte sistemática do modelo e que deve ser modelada e $\underline{\varepsilon}$ é a parte estocástica. O vetor $\underline{\beta}$ é estimado usando-se os

mínimos quadrados ordinários (MQO), ou seja, considerando os erros ε_i , $i = 1, 2, \dots, n$ como independentes.

Então, trabalha-se com a suposição (a ser validada sempre) de que os parâmetros tem distribuição Gaussiana, ou seja, $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$ e independentes. Assim, tem-se $E(\underline{\varepsilon}) = \underline{0}$ e $V(\underline{\varepsilon}) = \sigma^2 I$ e, considerando a soma dos quadrados dos erros que deve ser minimizado, $\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = \underline{\varepsilon}' \underline{\varepsilon}$, tem-se:

$$SQE = \underline{\varepsilon}' \underline{\varepsilon} = (\underline{Y} - X \underline{\beta})' (\underline{Y} - X \underline{\beta}) \quad (18)$$

que derivada em relação a $\underline{\beta}$ e seguindo as etapas bem conhecidas do MQO alcançou-se o estimador do vetor de parâmetros $\underline{\beta}$, que é:

$$\hat{\underline{\beta}} = (X'X)^{-1} X'Y, \quad (19)$$

conhecido como BLUE (melhor estimador não viciado). Continuando a análise tem-se $E(\hat{\underline{\beta}}) = \underline{\beta}$ e $V\hat{\underline{\beta}} = (X'X)^{-1} X' \sigma^2$ e pode-se construir intervalos de confiança e testes para β_i .

O estimador BLUE pode ser obtido por meio da notação matricial (17), resultando em:

$$\hat{Y} = X \hat{\beta} + \varepsilon \Leftrightarrow \varepsilon = \hat{Y} - X \hat{\beta} \quad (20)$$

A soma dos quadrados relacionada a regressão é então dada por:

$$\begin{aligned} SQR &= \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2 = \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2 = [\underline{Y} - \hat{\underline{Y}}]' [\underline{Y} - \hat{\underline{Y}}] = [\underline{Y} - \underline{Y}]^2 = \\ &= [\underline{Y} - X \hat{\underline{\beta}}]' [\underline{Y} - X \hat{\underline{\beta}}] = \underline{Y}' \underline{Y} - 2 \underline{Y}' X \hat{\underline{\beta}} + \hat{\underline{\beta}}' X' X \hat{\underline{\beta}} \end{aligned} \quad (21)$$

O vetor de derivadas parciais desta função em relação a $\underline{\beta}$ é dado por

$$\left. \frac{\partial SQR}{\partial \underline{\beta}} \right|_{\hat{\underline{\beta}}} = 0 - 2\underline{Y}'\underline{X} + 2\underline{X}'\underline{X}\hat{\underline{\beta}} \Rightarrow \underline{X}'\underline{X}\hat{\underline{\beta}} = \underline{X}'\underline{Y} \Rightarrow \hat{\underline{\beta}} = (\underline{X}'\underline{X})^{-1} \underline{X}'\underline{Y} \quad (22)$$

$$\left. \frac{\partial^2 SQR}{\partial \underline{\beta}^2} \right|_{\hat{\underline{\beta}}} = 0 + 2\underline{X}'\underline{X} > 0 \quad (23)$$

onde $2\underline{X}'\underline{X}$ é uma matriz simétrica definida positiva, que pelo método padrão de minimização de uma função indica a existência do mínimo.

2.9.2 Teste de Durbin Watson

O teste de Durbin Watson é aplicado para verificar se existe autocorrelação nos resíduos após o ajuste do modelo. A estatística do teste é definida como

$$D = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}, \quad (24)$$

onde $0 \leq D \leq 4$, sendo $e_t = y_t - \hat{y}_t$. Representa o quociente entre a soma das diferenças ao quadrado nos sucessivos resíduos e a soma de quadrados dos resíduos. Como a diferença perde 1 observação no momento das diferenças sucessivas, inicia-se em $t = 2$. O teste verifica a dependência, ou autocorrelação, dos resíduos por meio do teste

$$\begin{cases} H_0 : \rho = 0 \\ H_1 : \rho \neq 0. \end{cases} \quad (25)$$

O resultado do teste é dado por meio da análise dos valores críticos, estabelecendo ainda, a forma de correlação entre os resíduos. Para se aplicar este teste há necessidade de existir um ordenamento da variável resposta.

3 MODELAGEM

A fim de empregar as simulações computacionais na definição de um modelo que permita estabelecer a dependência entre a disposição geométrica, a lotação e a localização das saídas de uma sala de cinema em uma situação emergencial, sem pânico, torna-se necessário definir o ambiente de modelagem, assim como apresentar suas formas de interação. Tais características encontram-se estruturadas a seguir.

3.1 O AMBIENTE DE MODELAGEM

Atendendo as normas vigentes para a liberação e construção de obras públicas, assim como a arquitetura específica de uma sala de cinema, foi proposta a análise de evacuação de um ambiente fictício, modelado em pequenas dimensões. A escolha por desenvolver um ambiente para a aplicação da modelagem deu-se pelo fato de que o objetivo principal é realizar a comparação de diferentes geometrias e, a utilização de um ambiente real, poderia acarretar na identificação de possíveis casos de alteração ou negligência das estruturas estudadas. Devido a esse fato, propôs-se a modelagem de um ambiente específico para a simulação.

A fim de verificar os efeitos da lotação e da disposição geométrica na limitação do ambiente, para a modelagem do ambiente foram utilizadas como auxílio algumas fotos de cinemas, não identificadas, de forma a estabelecer uma modelagem mais próxima das geralmente utilizadas. Algumas das ilustrações encontram-se apresentadas na figura 11.



(a) Ambiente 1



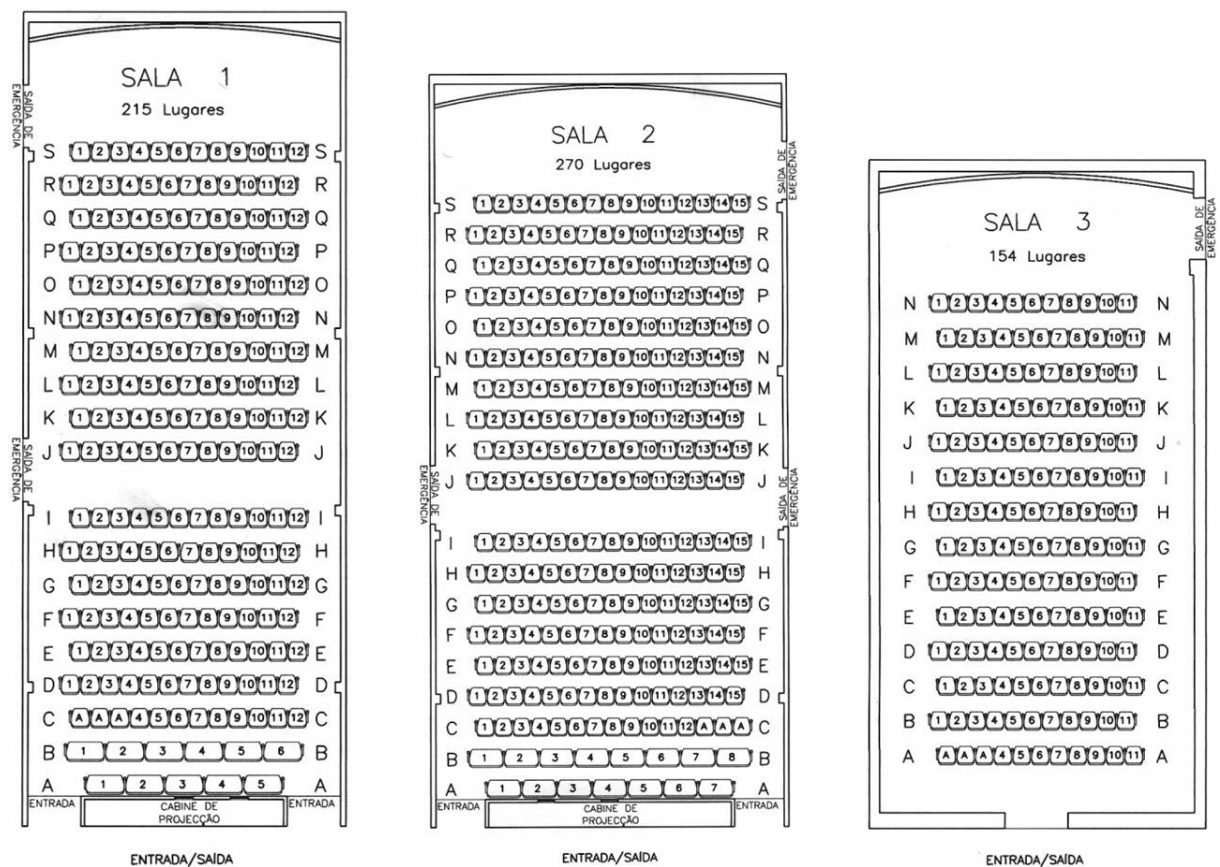
(b) Ambiente 2



(c) Ambiente 3

FIGURA 10: Imagens internas de 3 ambientes de cinema, com variações geométricas

Além das imagens internas de salas de cinemas, foi possível analisar algumas plantas baixas dos ambientes, conforme pode ser observado na figura 12.



(a) Sala 1

(b) Sala 2

(c) Sala 3

FIGURA 11: Imagens das plantas baixas de 3 ambientes de cinema, não identificados

Analisando tais fontes, escolheu-se empiricamente, uma lotação inicial máxima de 130 pedestres e, foram realizadas a representação de 5 salas de cinema,

nominadas por **Caso 1**, **Caso 2**, **Caso 3**, **Caso 4** e **Caso 5**, que distinguem-se nas posições dos corredores e das poltronas, sendo explicitados por meio das figuras 13, 14, 15, 16 e 17, respectivamente.

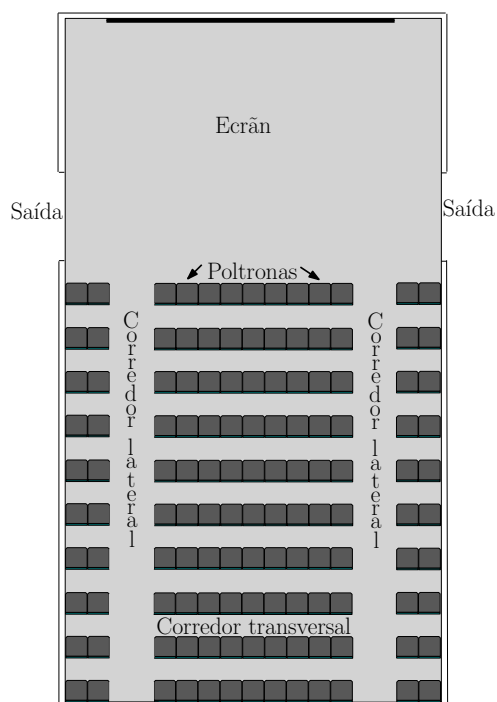


FIGURA 12: Geometria caracterizada na sala de cinema **Caso 1**
FONTE: A autora (2011)

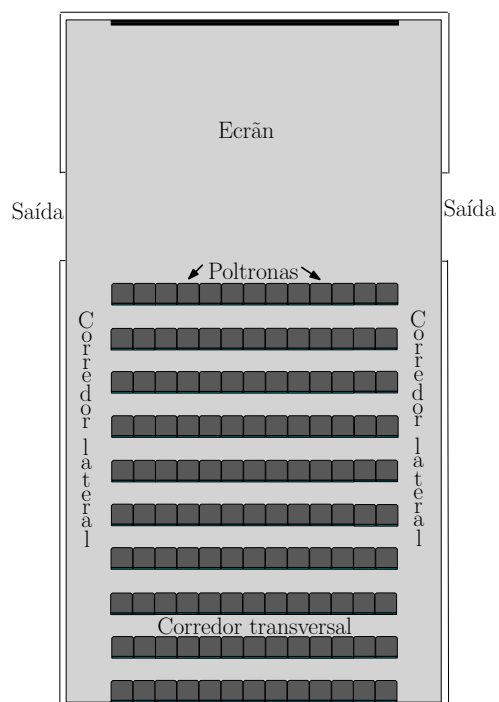


FIGURA 13: Geometria caracterizada na sala de cinema **Caso 2**
FONTE: A autora (2011)

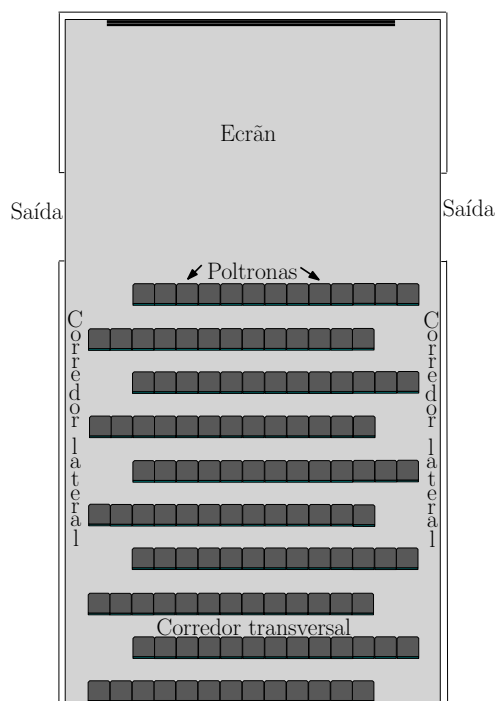


FIGURA 14: Geometria caracterizada na sala de cinema **Caso 3**

FONTE: A autora (2011)

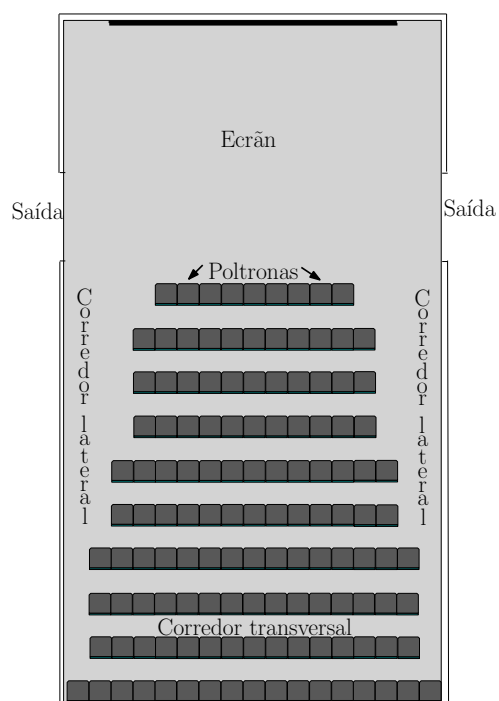


FIGURA 15: Geometria caracterizada na sala de cinema **Caso 4**

FONTE: A autora (2011)

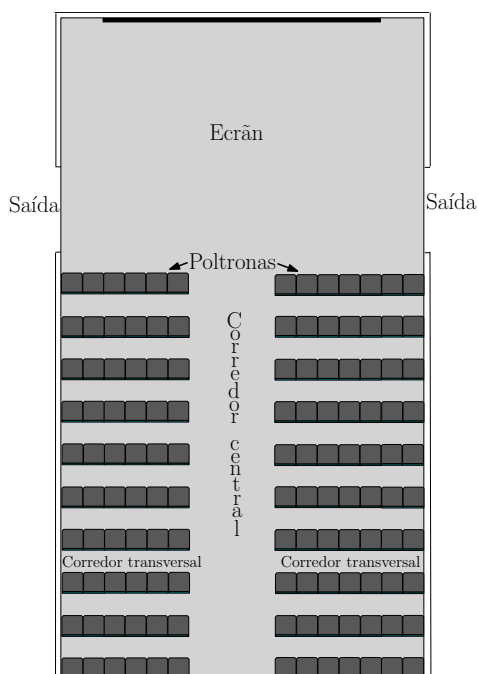


FIGURA 16: Geometria caracterizada na sala de cinema **Caso 5**

FONTE: A autora (2011)

Para efeitos de comparação, nos 5 casos verificados, algumas medidas mantêm-

se constantes, tais como: dimensões da sala ($8,5\text{ m} \times 15,5\text{ m}$), dimensões do ecrã ($8,5\text{ m} \times 6,0\text{ m}$), número de saídas (2), largura de cada porta de saída (2 m), largura dos corredores transversais (0,5 m), número máximo de espectadores sentados (130), dimensões da planta baixa das poltronas ($0,5\text{ m} \times 0,5\text{ m}$) e número de fileiras (10).

Como as características específicas para a abordagem da pesquisa referem-se à diferentes geometrias do ambiente, conseqüentemente, alteram-se as disposições das poltronas e medidas dos corredores. Tais variações encontram-se destacadas a seguir, para os casos analisados.

- **Caso 1**

- (a) Largura dos corredores laterais: 1 m;
- (b) Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 1 m; 4,5 m e 1 m, respectivamente;
- (c) Sequência de poltronas: 2, 9 e 2.

- **Caso 2**

- (a) Largura dos corredores laterais: 1 m;
- (b) Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 6,5 m;
- (c) Sequência de poltronas: 13.

- **Caso 3**

- (a) Largura dos corredores laterais: Alternados, com valores de 1,5 m e 0,5 m, respectivamente;
- (b) Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 6,5 m;
- (c) Sequência de poltronas: 13.

- **Caso 4**

- (a) Largura dos corredores laterais: Alternados, com valores de 4,5 m; 5,5 m; 6,5 m; 7,5 m e 8,5 m, respectivamente;
- (b) Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: Alternados, com valores de 2,0 m; 1,5 m; 1,0 m e 0,5 m;
- (c) Sequência de poltronas: alternadas, com valores de 9, 11, 13, 15 e 17.

- **Caso 5**

- (a) Largura do corredor central: 2 m;
- (b) Comprimento dos corredores transversais de cada fileira: 3,0 m e 3,5 m, respectivamente;
- (c) Sequência de poltronas: 6 e 7.

Essas informações caracterizam a estrutura da arquitetura dos ambientes modelados, que devem satisfazer ou atender as recomendações propostas para construção e liberação de ambientes públicos.

Relacionando as dimensões internas do ambiente com as apresentadas nas seções 2.2.1 e 2.3, pode-se verificar quais normas foram atendidas.

Inicialmente, tem-se que o ambiente possui uma área de $131,75 \text{ m}^2$. Com uma lotação máxima de 130 pedestres, a área individual reservada foi de aproximadamente 1 pedestre por m^2 (1 p/m^2), recomendado na prática pelo Comando do Corpo de Bombeiros do Paraná.

Considerando a lotação máxima de 130 pedestres e, adotando a densidade de 1 p/m^2 , o número de saídas pode ser definido por meio da aplicação da equação (1). Sendo $P = 130$ e $C = 100$, o somatório das saídas deve ser equivalente a no mínimo 1,3 unidades de passagem, ou seja 1,3 metros, distribuídos em pelo menos duas saídas. Atendendo a tal recomendação, o ambiente modelado foi satisfatório, já que o somatório das saídas totalizou 4 metros, distribuídos em duas saídas laterais.

Quanto à caracterização do ambiente, permite-se a classificação de uma sala de cinema como um local de reunião (F-5), de edificação baixa (L), com resistência mediana a propagação do fogo (Y). Essa classificação permite que seja estipulado as distâncias máximas dos trajetos de saída para um pedestre que esteja no ambiente.

Para a situação modelada, classificada como um ambiente de mediana a propagação do fogo com mais de uma saída, a distância máxima a ser percorrida no processo de saída deve ser de 30 metros (FERNANDES, 2010). Essa medida foi considerada para edificações sem chuveiros automáticos, caso contrário, a distância

poderia ser maior. Sendo assim, o ambiente modelado também atende as especificações, dado que, a maior trajetória realizada por um pedestre no interior é inferior a 25 metros, considerando que o fluxo seja direcionado às saídas mais próximas.

Os corredores, em alguns dos ambientes modelados (**Caso 3** e **Caso 4**), são inferiores a 1 metro, por consequência, não são atendidos alguns critérios de segurança. Tal metragem não foi reformulada pelo fato de que o objetivo da comparação está relacionado às mesmas áreas físicas e, aumentando as dimensões dos corredores, a área da sala de cinema também seria modificada. Porém, vale ressaltar que durante as simulações foram realizados os testes para ambientes, cujos corredores atendessem as dimensões mínimas, porém, não houve diferença significativa nos tempos totais de evacuação obtidos. Em tais adaptações, a largura da sala passou de 8,5 m para 10,5 metros, sendo aumentado 1 m em cada uma das laterais. Dessa forma, optou-se em manter os ambientes de mesmas dimensões, já que a variação da área não influenciaria no tempo total simulado.

Como as dimensões mínima e máxima entre a tela e a última fileira de poltronas, propostas em Emery (2011), estão relacionadas à dimensão da tela, não há dificuldades em verificá-las no modelo, sendo de fácil validação.

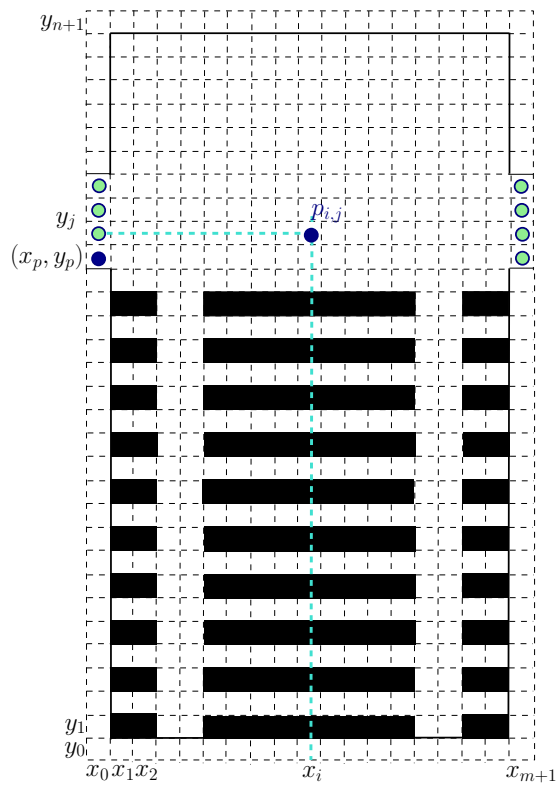
3.2 ADAPTAÇÃO AO MODELO

O processo de modelagem será detalhadamente descrito a seguir, de modo a fornecer subsídios para compreender o processo de formulação e de adaptação pela teoria dos autômatos celulares.

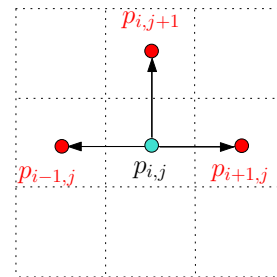
A partir da modelagem das plantas ilustradas nas figuras 13, 14, 15, 16 e 17, torna-se necessário definir uma malha retangular bidimensional que auxiliará na definição do espaço. Essa malha é obtida por meio da divisão do ambiente em 32 linhas e 19 colunas igualmente espaçadas, por sua vez, definindo 608 quadrados, de lado 0,5 metro. Essa discretização designa um autômato celular e cada um dos quadrados obtidos, representam uma célula e definem um elemento do autômato celu-

lar.

Por meio da malha é possível relacionar o ambiente a um sistema de coordenadas cartesianas, no qual cada célula é representada por um par ordenado (x_k, y_l) , no qual $k = 0, \dots, 18$ indica a coluna e $l = 0, \dots, 31$ a linha nas quais a célula encontra-se localizada. A variação dos índices é necessária devido ao fato de que a limitação do ambiente é feita pelas paredes e, estas foram incluídas na definição da malha por meio de linhas e colunas definidas como limite de espaço.



(a) Disposição da malha e caracterização das células



(b) Possibilidades de movimento para o pedestre $p_{i,j}$ destacado na malha

FIGURA 17: Disposição geométrica da malha para o caso bidimensional
FONTE: A autora (2011)

De acordo com Tregenza (1976) sugere-se que o espaço médio ocupado por um pedestre em um ambiente real é igual a $0,2 \text{ m}^2$ e, abaixo de tal valor, uma evacuação emergencial poderia levar ao pânico. Dessa forma, adotando-se como densidade

máxima o valor de 4 p/m^2 , tem-se que a área ocupada por um pedestre é de $0,25 \text{ m}^2$, satisfazendo assim as suposições de lotação, em situações ditas sem pânico. A título de ilustração, reservando essa medida, pode-se verificar que cada área de 1 m^2 pode ser ocupada por até 4 pedestres, conforme pode ser observado na figura 19.

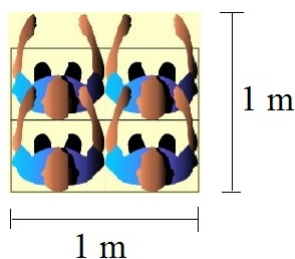


FIGURA 18: Representação da densidade máxima por m^2

FONTE: Ghiorzi (2011), adaptado

Equivalentemente, pode-se reservar uma área quadrada, de lado 0,5 metro para um único pedestre. Considerando que a célula destinada a esse pedestre esteja associada a i -ésima coluna e a j -ésima linha, no sistema de coordenadas cartesianas, sua posição é dada por (x_i, y_j) e, o pedestre pode ser nominado por p_{ij} de acordo com a sua localização. Nesse sentido, por meio da figura 18(a), pode ser verificada a posição de um pedestre p_{ij} exemplificando tal relação.

Observando as normas relacionadas às salas de cinemas, pode-se verificar também que a mesma área pode ser relacionada para uma poltrona, já que, as suas dimensões mínimas são dadas por 0,45 metro e 0,5 metro.

De acordo com a discretização do espaço, pode-se verificar que as células coincidem com as poltronas, em termos de área. Além disso, a célula também define a área ocupada por um pedestre. Com isso, cada célula definida pela malha satisfaz as limitações para possível existência de um único pedestre ou de uma única poltrona, quando feita uma correspondência com a sua localização no ambiente.

Feita a representação do ambiente em um sistema de coordenadas cartesianas, o processo de análise inicial consiste em definir o estado inicial dos elemen-

tos da malha. Isso pode ser realizado atribuindo valores numéricos a cada uma das células que compõem o autômato celular. Sendo assim, tal adaptação pode ser inicialmente verificada no estabelecimento dos estados iniciais, sendo apresentados a seguir.

3.2.1 Descrição da modelagem

Considerando a malha inicial relacionada a discretização do ambiente em um sistema de coordenadas, pode-se definir o estado inicial do autômato celular por meio de uma malha auxiliar virtual, sob a qual define-se os estados das células. Esta malha possui as mesmas dimensões da malha inicial e, atua no armazenamento de informações relacionadas ao ambiente, tais como localização de saídas, obstáculos e dos limites físicos, ou seja, as paredes.

O valor numérico atribuído a cada célula da malha auxiliar é realizado de forma a designar virtualmente a forma de ocupação da célula correspondente na malha inicial. Sendo assim, os valores numéricos utilizados no estado inicial da simulação são dados por:

- 0 - Célula livre;
- 1 - Célula ocupada por um pedestre;
- 2 - Célula ocupada por uma poltrona;
- 3 - Célula correspondente à saída;
- 4 - Célula correspondente à parede.

Considerando a malha representada na figura 18 e atribuindo os valores numéricos iniciais referentes à ocupação do espaço, define-se o estado inicial do autômato celular. Tal designação pode ser verificada por meio da figura 20, que apresenta os valores numéricos atribuídos a cada uma das 608 células definidas, ainda não ocupadas por pedestres.

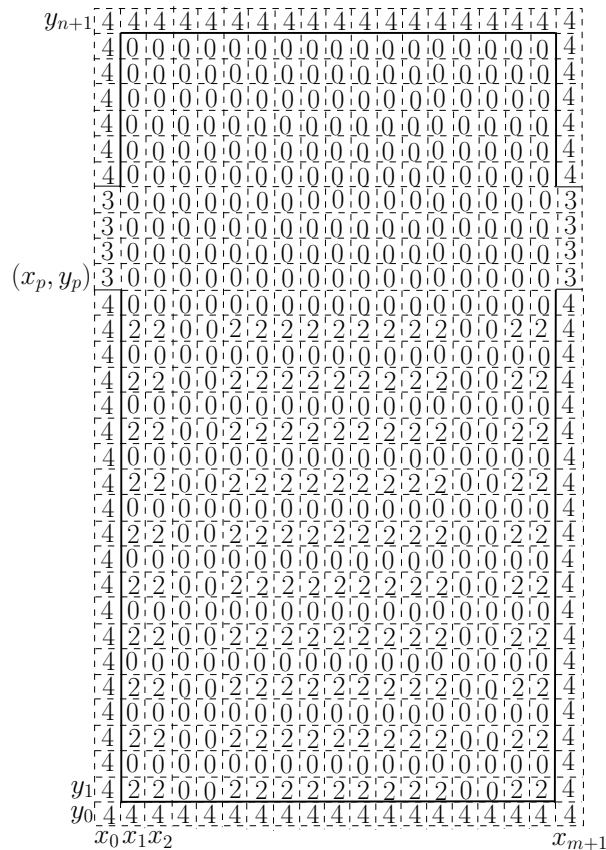


FIGURA 19: Caracterização do estado inicial do autômato celular

FONTE: A autora (2011)

Pode-se verificar que a área correspondente a cada obstáculo foi diferenciada e, os mesmos elementos caracterizados por um valor numérico comum, anteriormente designado.

A viabilidade na atualização dos estados das células e as possibilidades de movimento a cada iteração são definidos a partir da análise do valor numérico atribuído a célula, sendo de fundamental importância na evolução da simulação. Caso as células vizinhas estejam definidas com valores 1, 2 ou 4, não há possibilidade de ocupação, no instante da iteração.

A presença de saídas, poltronas ou paredes são fatores que representam obstáculos fixos durante a simulação ou direcionam o movimento, assim, são mantidos constantes ao longo da simulação e, não são atualizados. Por outro lado, não são apenas os obstáculos fixos que impedem a ocupação de uma célula, já que a pre-

sença de um pedestre em uma célula já define sua ocupação máxima. Dessa forma, atua como obstáculo variável a cada iteração.

A malha auxiliar estabelece também a posição referente a um pedestre. Se uma célula da i -ésima coluna e da j -ésima linha está definida por valor 1, então a posição do pedestre em termos de colunas e linhas, num sistema cartesiano, é definida por (x_i, y_j) . Dessa forma, todos os pontos definidos pela malha, representam um elemento do autômato celular e, sua atualização depende da análise das possibilidades de movimento, designadas virtualmente por meio da malha auxiliar, que faz uma analogia ao processo de evacuação.

A título de exemplificação, tem-se a figura 21 que trata das possibilidades de movimento para o pedestre p_{ij} , a partir da análise das células ditas vizinhas, dadas pela vizinhança de Moore, de raio 1. As células consideradas como vizinhas na atualização dos estados encontram-se destacadas.

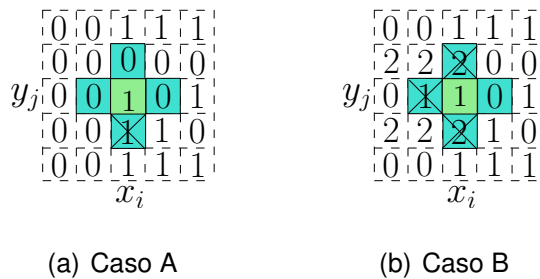


FIGURA 20: Análise da vizinhança para um pedestre p_{ij} em dois casos distintos

FONTE: A autora (2011)

Pode-se verificar que no Caso A, das 4 células vizinhas, 3 possuem valor numérico 0, ou seja, estão disponíveis. Nesse caso, na atualização da iteração, uma delas passa a ter valor 1, enquanto as demais e a central, dada por (x_i, y_j) terão valor 0 e, se tornam novamente disponíveis para a próxima iteração. Já no Caso B, as possibilidades são reduzidas. As células vizinhas de valor 2 simulam, virtualmente, a presença de poltronas e, a lateral esquerda encontra-se ocupada. Com isso, há apenas uma possibilidade de movimento, que pode ser atualizada da mesma forma, caso haja movimento. Essa análise é realizada para cada uma das células que compõem o

autômato celular, cuja vizinhança é bastante restrita a sua posição.

Feita a definição do ambiente e a limitação do número de estados que as células podem assumir, parte-se para o estabelecimento das regras de interação.

3.2.2 Aplicação da modelagem

Tratando-se de uma situação de evacuação em condições sem pânico, sugere-se algumas suposições iniciais ao modelo: há um direcionamento dos pedestres para as saídas mais próximas, são evitados obstáculos mediante o seu campo de visão e, não há possibilidade do movimento retrógrado.

O fato de o pedestre escolher a saída mais próxima e não a de menor densidade é comentada por Was (2010), ressaltando que o principal fato externo que influencia no traço da saída de um ambiente numa situação emergencial, de acordo com experimentos reais, é a distância. O direcionamento é definido pela limitação da movimentação durante a atualização dos estados das células e, adotando a vizinhança de Moore, a influencia das células vizinhas na atualização das células é extremamente limitada, simulando então, um campo de visão também limitado.

Determinada as variáveis iniciais e estabelecido o ambiente modelado, assim como o número de replicações a ser realizado, parte-se para o estabelecimento das regras de interação entre os pedestres, associadas às hipóteses iniciais anteriormente descritas. O fluxo é direcionado a saída geometricamente mais próxima ao local no qual foi alocado, sendo assim, o comportamento do fluxo pode ser estabelecido por regiões. Para o ambiente modelado em **Caso 1** tais regiões podem ser observadas por meio da distinção das cores, por meio da figura 21, que caracterizam regiões de mesma movimentação, sendo generalizados para os demais casos sem maiores complicações. Células com igualdade de cores possuem as mesmas possibilidades de movimento.

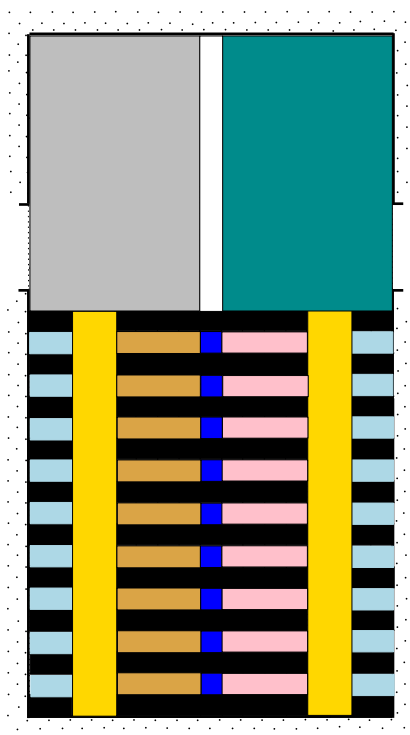


FIGURA 21: Distinção espacial dos movimentos

FONTE: A autora (2011)

Nas regiões frontais, o movimento não se limita apenas entre as poltronas, podendo ser também frontal ou lateral. Nos corredores há possibilidade de movimento frontal, enquanto lateralmente é restrito ao local, já que, a vizinhança pode representar uma poltrona. Entre as poltronas, o movimento é reduzido apenas para as laterais e, quando uma das laterais representar uma parede, há apenas uma possibilidade de movimento.

Por outro lado, como o movimento é direcionado a saída mais próxima, há aleatoriedade no movimento lateral apenas para as células centrais, que encontram-se equidistantes as duas saídas ou quando há disponibilidades na ocupação das células, satisfazendo as restrições. Para os demais casos o movimento lateral, por sua vez, é definido.

Adotando a vizinhança de Moore o movimento dos pedestres, a fim de evitar colisões, está restrito a dois tipos de obstáculos: fixos (poltronas e paredes) ou móveis (pedestres). Caso o estado das células que influenciam o movimento for igual a 0

(estado livre), o movimento será aleatório, com velocidade constante e direcionado a saída geometricamente mais próxima. Entretanto, se as células estiverem ocupadas, o pedestre permanece na mesma célula determinada pela iteração anterior, ou seja, não efetua movimento.

Em alguns pontos tal mobilidade é extremamente limitada, como por exemplo, entre as fileiras. Assim, a influência da vizinhança é quase mínima, já que o movimento deve seguir o fluxo para a saída desejada, enquanto que nos corredores laterais e na área frontal o movimento é mais flexível.

Como se trata de um modelo matemático discreto no tempo e nas variáveis, a definição do movimento é caracterizado pela atualização dos estados numéricos, que por sua vez, simulam o movimento e a presença de pedestres no ambiente. Ilustrando tal processo de iteração e atualização numérica, tem-se a figura 23, que trata das possibilidades de movimento para saída de três pedestres, destacados na malha como valor 1, até a evacuação. As iterações $k = i$, $k = i + 2$, $k = i + 3$ e $k = i + 4$ representam o movimento lateral, enquanto a iteração nominada por $k = i + 1$ representa o movimento frontal, com as respectivas atualizações dos estados numéricos.

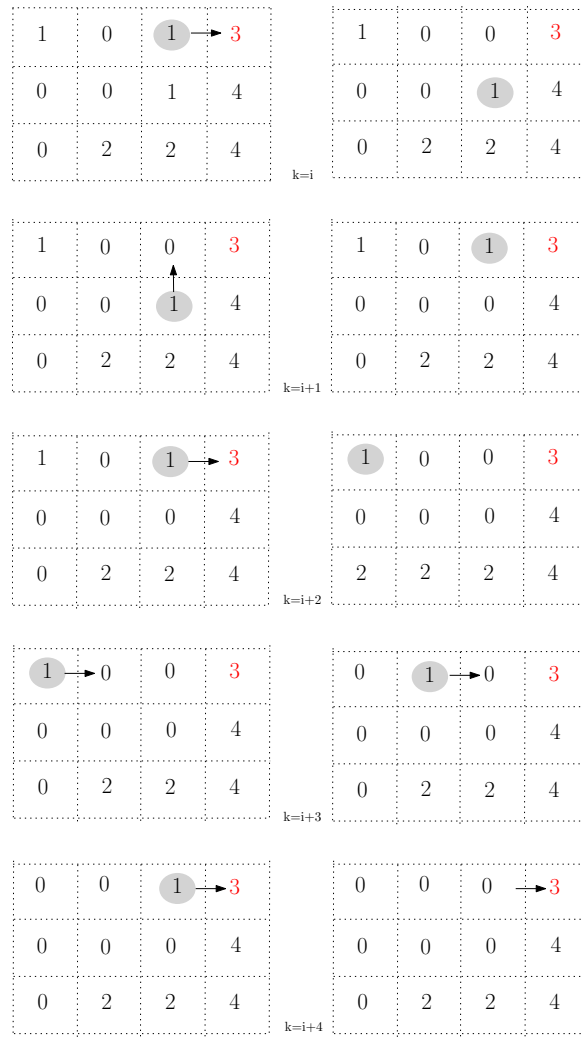


FIGURA 22: Movimentações e atualização numérica da malha para um caso particular

FONTE: A autora (2011)

3.2.3 Formulação do algoritmo

Como dados iniciais devem ser fornecidos as dimensões do ambiente, dadas pelo número de células nas direções x e y , respectivamente nx e ny ; as coordenadas da célula de saída padrão (x_p, y_p) ; o número de simulações $nsim$ e o número total de pedestres que definem cada simulação np . Tais informações são importadas de um arquivo com extensão “.txt”. A partir de então, é necessário definir a malha auxiliar, ou seja, estabelecer o valor numérico que deve ser atribuído a cada célula do sistema cartesiano. Essa designação é realizada após a definição prática do ambiente, verificando quais características do ambiente são consideradas na malha auxiliar.

Com a identificação do estado inicial das células que compõem a malha é possível iniciar a simulação. As células correspondentes às saídas são dadas por (x_p, y_{p+i}) , com $i = 0, 1, 2, 3$ e por (x_{m+1}, y_{p+i}) , com $i = 0, 1, 2, 3$, sendo essas, responsáveis pelo direcionamento do movimento durante a simulação.

Os pedestres são aleatoriamente gerados na malha até que suas coordenadas representem as células correspondentes às poltronas, definidas por meio de uma segunda malha auxiliar, que trabalha com a atualização automática da malha inicial e da que define o ambiente. Se a lotação é máxima, iniciam das células que representam as poltronas, de onde iniciam a dinâmica do movimento.

Tal processo é realizado, por exemplo, designando um número pseudo-aleatório entre 0 e nx . O mesmo é realizado para a ordenada y , por meio de sequências geradas pelo programa, determinando as coordenadas de localização do pedestre gerado. Emprega-se o Método de Simulação de Monte Carlo na designação inicial das coordenadas que representam os np pedestres na malha, que terão valor numérico 1 na malha auxiliar.

Seja o tempo $t = 0$ e $p_{i,j}$ um pedestre escolhido aleatoriamente, alocado na poltrona de coordenada (x_i, y_j) . Verifica-se o estado das células vizinhas: se a célula (x_i, y_{j+1}) estiver livre, então o pedestre $p_{i,j}$ ocupa essa posição, se não, verifica-se se a célula lateral que conduz a saída mais próxima está disponível, caso afirmativo, ocupa as posições $(x_i + 1, y_j)$ ou (x_{i-1}, y_j) . Se nenhuma das condições for verificada o pedestre continua na posição definida pela iteração anterior, ou seja, (x_i, y_j) .

Caso haja movimento, é atribuído o estado numérico 1 a célula ocupada, enquanto que a célula ocupada pelo mesmo pedestre na iteração anterior, é atualizada automaticamente, tornando-se disponível e, de valor 0. Dessa forma, estará livre para ocupação de um próximo pedestre definido pela vizinhança. O fato da célula passar a ter valor 1, significa que houve movimento do pedestre quando relacionado à malha auxiliar.

Incrementa-se o tempo, $t = t + 1$, e um novo pedestre é escolhido aleatoria-

mente, repetindo os passos descritos. A movimentação só é garantida pela atualização dos estados no momento em que a célula que compõe a vizinhança tem valor 0. Caso a nova posição a ser ocupada represente a saída, ou seja, tenha valor numérico 3, o número de pedestres diminui em uma unidade, ou seja, atualiza-se para 0. A cada unidade de tempo decorrido, o número de movimentações é diminuído em uma unidade.

As simulações são realizadas até que ocorra a evacuação total, ou seja, incrementa-se o tempo ao passo em que o número de pedestres que atingem as saídas seja condizente ao total inicialmente gerado, equivalentemente, $n_p = 0$. Nesse caso há evacuação total. Caso contrário o critério de parada é satisfeito e, não há evacuação, o número de simulações máximo é extrapolado.

Como saída o programa retorna o número de movimentações, para a evacuação total do cinema analisado por meio de uma quantidade fixa de simulações, em intervalos discretos.

Uma estrutura do algoritmo que representa a simulação pode ser observada por meio da figura 24.

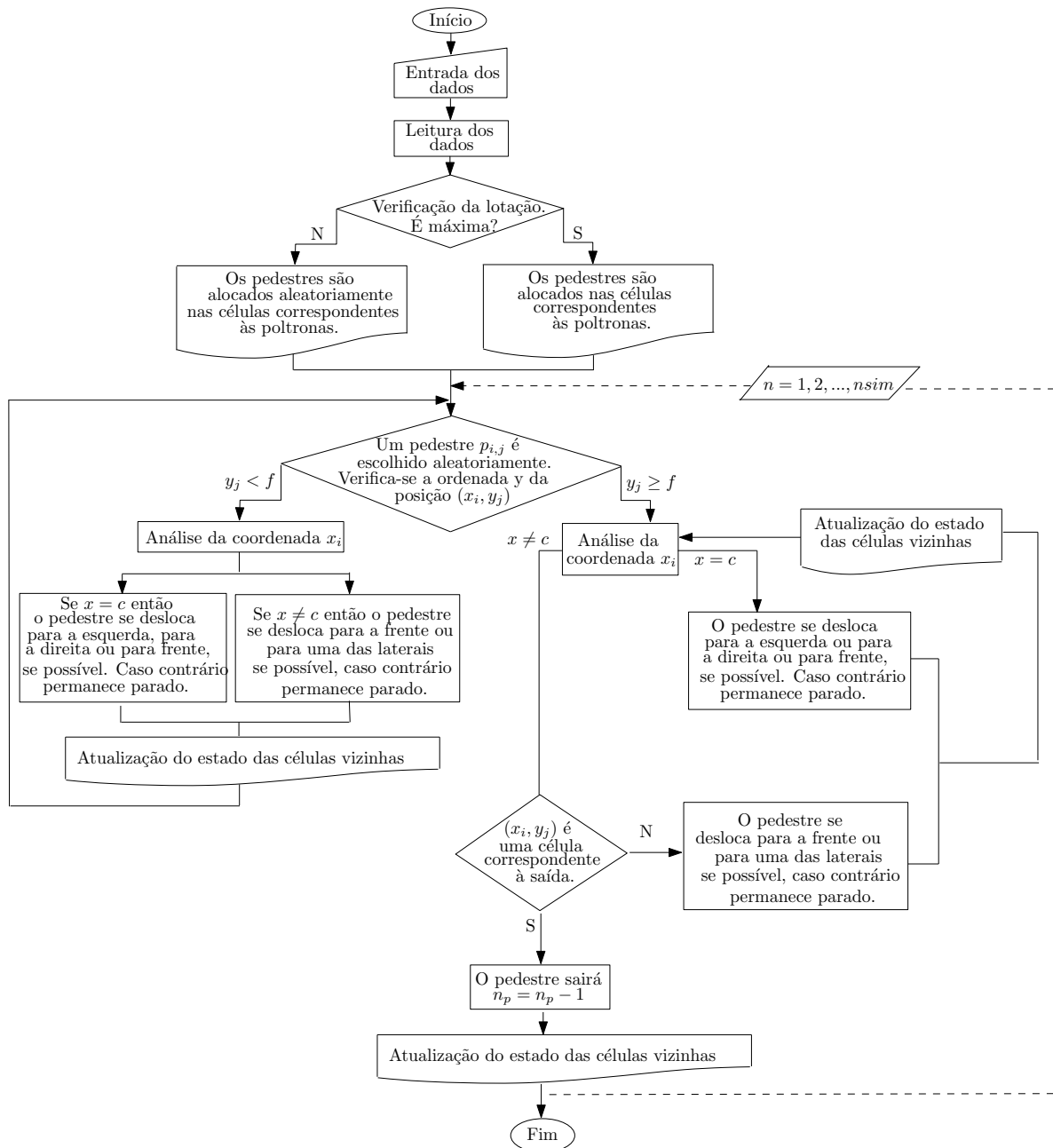


FIGURA 23: Representação do algoritmo

FONTE: A autora (2011)

Tem-se que f corresponde a ordenada da primeira fileira de poltronas, c a abscissa central no sistema de coordenadas cartesianas do ambiente, n_p o número de pedestres alocados na malha e $nsim$ o número total de simulações.

O número de replicações designa o número de repetições de uma simulação, com base num estado inicial diferente, já que é realizado a partir de uma nova semente

de geração de números aleatórios. Um número pequeno de replicações pode restringir a variabilidade dos dados, enquanto um valor alto, pode representar um alto custo computacional. Dessa forma, o número de replicações de uma simulação deve ser estabelecido de forma a garantir a precisão requerida de forma que o erro amostral da média tenda a zero. Nesse caso, pode ser estimado o número limite de replicações.

A medida de precisão da média amostral definida pela simulação é calculada por meio do erro padrão da média. O erro padrão da média é dado por $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$, sendo σ o desvio padrão e n o tamanho da população, ou por $\frac{s}{\sqrt{n}}$, onde s é o desvio padrão da amostra e n o número de elementos da amostra (SAMOHYL, 2009). Tal análise pode descrever significativamente a relação entre o número de replicações de uma simulação, associada ao tempo e custo computacional.

3.2.4 Escolha dos parâmetros

O algoritmo retorna o número de movimentações necessárias para a evacuação total. Como cada pedestre tem o movimento definido entre células vizinhas, adjacentes, torna-se possível acrescentar parâmetros que possibilitem estimar o tempo total de evacuação, em segundos. Para tanto, algumas observações se fazem necessárias.

Considerando o deslocamento de um pedestre do ponto médio de uma célula até o ponto médio de uma célula adjacente, figura 25, com probabilidade de movimento conhecida e definida pelo algoritmo, o movimento caracterizado por um pedestre é de 0,5 metro a cada intervalo de tempo.

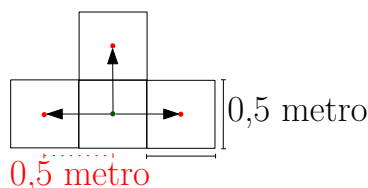


FIGURA 24: Possibilidades de movimento

FONTE: A autora (2011)

De acordo com Jian, Lizhong e Daoliang (2005) em condições emergenciais, sem pânico, a velocidade pode ser dada por 1 m/s, logo, o tempo correspondente a cada movimentação resulta em 0,5 segundo. Consequentemente, o tempo médio de evacuação t_e , da sala de cinema, com velocidade definida pode ser calculado por

$$t_e = 0,5 \times n \quad (26)$$

onde n representa o número de movimentações para as *nsim* simulações realizadas para cada caso de lotação.

Como o objetivo é aproximar o modelo à uma situação real com a inclusão de parâmetros, pode-se incluir o tempo de reação dos pedestres. Denomina-se tempo de reação ao intervalo de tempo decorrente entre o instante real de ocorrência de uma situação e o instante de ação.

Esse é um termo comumente usado nas áreas de Cinemática e Dinâmica, caracterizando experimentos voltados à análise de tempos. De acordo com Zanella (2008) há dois tempos de reação: o tempo de reação normal, dado por 0,75 segundo e o tempo de reação retardado, igual a 2 segundos.

O tempo de reação retardado refere-se a influencia de fatores comportamentais internos e/ou externos, por sua vez, pode ser mais válido ao modelo, por englobar uma quantidade maior de observações associadas aos pedestres. Acrescentando o tempo de reação retardado, o tempo médio total de evacuação do ambiente t_t , para cada uma das lotações verificadas nos ambientes definidos, pode ser obtida a partir da equação (26) por

$$t_t = 2 + 0,5 \times n. \quad (27)$$

Associando-as aos parâmetros de velocidade e tempo de reação para situações emergenciais, pode-se estabelecer o tempo médio total de evacuação, sujeito às hipóteses iniciais. Além disso, o emprego de análises estatísticas voltadas a inferência

e generalização dos resultados, possibilita determinar modelos que associem o tempo de evacuação em função do número de pedestres.

4 RESULTADOS

Com o objetivo de identificar o tempo médio total de evacuação de uma sala de cinema por meio da aplicação de simulações computacionais, foram realizados testes para diferentes lotações do ambiente. O fato dos pedestres serem alocados aleatoriamente nas áreas correspondentes às poltronas torna possível estabelecer uma relação de dependência entre o número de pedestres e o correspondente tempo médio total de evacuação, sendo mais próximo das características de lotações reais.

Dessa forma, torna-se possível comparar o tempo médio total de evacuação para diferentes geometrias e localização das saídas, estabelecendo um modelo que minimize o tempo total de evacuação de uma sala de cinema, sob condições/hipóteses pré-estabelecidas. Em todos os casos, a análise inicial parte da aplicação de estudos referentes à dinâmica de pedestres e seu comportamento quando direcionado a diferentes saídas.

Nessa etapa foram realizados a análise de 5 casos de geometria para a sala de cinema proposta, com capacidade máxima de 130 espectadores, nominados por **Caso 1**, **Caso 2**, **Caso 3**, **Caso 4** e **Caso 5**. A estrutura básica do programa mantém-se para os 5 casos, porém há uma variação na definição do ambiente e na limitação dos movimentos, que encontram-se direcionados à saída mais próxima e esta depende da posição das poltronas, individualmente. Como código padrão, apresenta-se o algoritmo estabelecido para o **Caso 1** no apêndice A, identificado por “*cine_mov*”. O fato de apresentar tal algoritmo, em especial, deve-se ao fato de que para este caso, os resultados foram mais significativos numericamente, conforme explanado a seguir.

As simulações foram implementadas em linguagem Pascal, realizadas em um computador Intel® Pentium® processor T4300 (2.1 GHz, 800 MHz FSB), Intel® GMA 4500 M, 3 GB memory e 250 GB HDD.

Foram realizadas simulações para 26 casos de lotação para as 5 geometrias definidas, sendo verificados os casos entre 5 a 130 pedestres, com aumento constante de 5 pedestres. Considerando inicialmente o número de replicações das simulações com valores iguais a 10 , 10^2 , 10^3 e 10^4 , não houve diferença significativa entre as médias das simulações para os 4 casos realizados. Dessa forma, considerando como medidas de precisão o tempo computacional e a análise do erro padrão da média, foi fixado o número de 10^3 replicações para cada simulação, resultando em uma precisão de 10^{-2} e uma média de 3 segundos para cada rodada de simulação.

Algumas considerações a cerca das simulações e resultados apresentados a seguir podem ser encontrados em Silva et al. (2011a, 2011b, 2011c).

4.1 SIMULAÇÕES

Conforme apresentado anteriormente, busca-se adaptar a teoria dos autômatos celulares bidimensionais, por meio do método de Simulação de Monte Carlo, estabelecendo um método computacional para verificar a evacuação de um ambiente, sujeito a algumas restrições de movimento e variantes geométricas. A seguir apresentam-se os resultados para as situações analisadas.

4.1.1 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente **Caso 1**

Sobre os dados resultantes das simulações foi aplicada a velocidade de deslocamento dos pedestres (1 m/s), assim como o tempo médio de reação retardado (2 seg.), conforme apresentado em 3.2.4. A análise é feita sobre os dados que estabelecem o tempo médio total de evacuação do ambiente proposto, que é dado em intervalos discretos, para cada lotação.

Os valores referentes as simulações, em segundos, resultaram em uma tabela de ordem 1000×26 , representando as 1000 simulações para cada uma das lotações estimadas. Utilizando como auxílio o *software* Minitab 15, foram estabelecidos alguns resultados numéricos, os quais são apresentados na tabela 3.

TABELA 3: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo médio total de evacuação do ambiente descrito em **Caso 1**, aplicadas em 26 casos de lotação

Número de pedestres	Tempo médio (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
5	13,584	1,530	8,0	14,0	16,5
10	14,621	1,028	11,0	14,5	17,5
15	15,228	0,808	12,0	15,5	17,5
20	15,685	0,810	13,0	15,5	19,5
25	16,316	0,909	14,0	16,0	21,0
30	17,029	1,020	14,5	17,0	21,0
35	18,037	1,086	15,5	18,0	22,5
40	19,039	1,196	16,0	19,0	23,5
45	20,273	1,255	17,0	20,0	25,5
50	21,440	1,301	18,5	21,5	26,0
55	22,707	1,344	19,0	22,5	27,5
60	24,102	1,350	21,0	24,0	29,0
65	25,307	1,374	21,5	25,0	32,0
70	26,560	1,426	22,5	26,5	31,5
75	27,989	1,454	24,0	28,0	35,5
80	29,283	1,500	25,5	29,0	35,5
85	30,558	1,443	27,0	30,5	37,0
90	32,003	1,454	28,5	32,0	37,0
95	33,261	1,390	29,5	33,0	38,0
100	34,502	1,384	31,0	34,5	40,0
105	35,789	1,366	32,0	35,5	41,0
110	37,184	1,418	34,0	37,0	43,0
115	38,367	1,671	34,0	38,5	45,0
120	39,735	1,391	36,5	39,5	45,0
125	41,054	1,353	37,0	41,0	47,0
130	42,487	1,326	38,5	42,5	47,0

FONTE: A autora (2011)

Para cada um dos 26 casos de lotação analisados que envolveram o número de pedestres aleatoriamente gerados no ambiente, foram determinados os valores referentes ao tempo médio total de evacuação, o desvio-padrão, assim como os valores referentes às medidas de tendência central, tais como o mínimo, a mediana e o máximo. Os valores foram designados para cada saída das 1000 simulações, totalizando o número de 26000.

Pode-se verificar que os tempos médios de evacuação foram próximos ao valor representado pelas medianas. Por sua vez, há uma maior uniformidade nos da-

dos, o que leva conseqüentemente, a uma menor dispersabilidade em cada uma das etapas da simulação, ocasionando uma maior aderência aos resultados do modelo.

4.1.2 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente **Caso 2**

As simulações aplicadas ao processo de evacuação do ambiente **Caso 2**, referentes ao tempo médio total de evacuação em segundos aplicado a sala de cinema possibilitam destacar algumas informações numéricas, observadas na tabela 4.

TABELA 4: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo médio total de evacuação total do ambiente descrito em **Caso 2**, aplicados em 26 casos de lotação

Número de pedestres	Tempo médio (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
5	13,439	1,603	8,0	13,5	16,5
10	14,438	1,061	10,0	14,5	17,0
15	14,991	0,831	11,5	15,0	17,5
20	15,426	0,775	13,0	15,5	19,0
25	15,869	0,791	13,5	16,0	20,0
30	16,552	1,026	14,0	16,5	21,5
35	17,565	1,323	15,0	17,5	23,5
40	18,869	1,523	15,5	18,5	25,5
45	20,320	1,739	16,0	20,0	26,0
50	21,846	1,684	17,5	21,5	28,5
55	23,343	1,716	19,0	23,0	30,5
60	24,831	1,688	20,5	24,5	30,5
65	26,331	1,717	21,5	26,0	34,0
70	27,697	1,705	23,5	27,5	35,0
75	28,894	1,583	23,5	29,0	34,5
80	30,192	1,671	26,0	30,0	37,0
85	31,343	1,634	26,0	31,0	37,5
90	32,560	1,671	27,5	32,5	38,5
95	33,703	1,614	30,0	33,5	39,5
100	34,867	1,671	30,0	35,0	41,5
105	35,977	1,571	32,0	36,0	41,0
110	37,251	1,700	33,0	37,0	43,0
115	38,264	1,645	34,0	38,0	44,0
120	39,451	1,666	34,5	39,5	45,5
125	40,711	1,530	36,5	40,5	47,5
130	42,004	1,706	37,5	42,0	48,5

FONTE: A autora (2011)

Também pode ser verificado que para cada um dos 26 casos de lotação ana-

lisados os valores do tempo médio total de evacuação e a mediana são próximos, o que pode ser observado numa situação que envolva dados uniformes, já que há uma distribuição estabelecida para os dados.

4.1.3 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente **Caso 3**

Para o ambiente caracterizado em **Caso 3**, os resultados das simulações são apresentados na tabela 5.

TABELA 5: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo médio total de evacuação total do ambiente descrito em **Caso 3**, aplicados em 26 casos de ocupação

Número de pedestres	Tempo médio (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
5	13,448	1,605	7,5	13,5	16,5
10	14,605	1,003	10,5	14,5	17,0
15	15,440	0,961	11,5	15,5	18,5
20	16,659	1,212	13,5	16,5	23,0
25	18,240	1,427	15,0	18,0	23,5
30	20,074	1,536	16,5	20,0	26,5
35	22,120	1,603	18,0	22,0	29,0
40	24,168	1,718	20,0	24,0	30,5
45	26,180	1,765	22,0	26,0	32,5
50	28,299	1,865	24,0	28,0	37,0
55	30,276	1,808	25,5	30,0	37,5
60	32,458	1,855	27,5	32,5	40,5
65	34,496	1,897	29,5	34,5	41,5
70	36,553	1,923	32,0	36,5	44,0
75	38,698	1,894	34,0	38,5	45,5
80	40,737	1,915	36,0	40,5	48,0
85	42,774	1,883	38,5	42,5	51,0
90	44,788	1,776	40,5	44,5	51,5
95	46,881	1,842	42,5	46,5	54,0
100	48,949	1,708	45,0	49,0	54,5
105	50,953	1,606	47,0	51,0	57,5
110	53,091	1,595	49,5	53,0	58,5
115	55,120	1,571	51,5	55,0	61,0
120	57,148	1,489	54,0	57,0	63,0
125	59,172	1,394	56,0	59,0	65,0
130	60,937	1,434	57,5	61,0	66,0

FONTE: A autora (2011)

4.1.4 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente **Caso 4**

Os dados referentes as simulações aplicadas ao processo de evacuação do ambiente **Caso 4**, encontram-se na tabela 6.

TABELA 6: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo médio total de evacuação total do ambiente descrito em **Caso 4**, aplicados em 26 casos de ocupação

Número de pedestres	Tempo médio (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
5	13,589	1,403	8,5	13,5	16,5
10	14,597	1,026	10,5	14,5	17,5
15	15,272	0,960	12,0	15,5	20,0
20	15,973	1,060	12,5	16,0	20,5
25	16,885	1,226	14,0	16,5	22,0
30	18,049	1,415	14,5	18,0	23,0
35	19,324	1,605	15,5	19,25	25,5
40	20,645	1,622	16,5	20,5	27,0
45	22,142	1,765	18,0	22,0	28,0
50	23,745	1,732	19,0	23,5	29,5
55	25,360	1,769	20,0	25,5	30,5
60	26,958	1,841	22,0	27,0	33,0
65	28,591	1,801	24,0	28,5	36,0
70	30,169	1,893	25,0	30,0	37,5
75	31,778	1,864	26,5	31,5	38,5
80	33,333	1,854	28,5	33,5	39,0
85	34,882	1,925	28,5	35,0	41,5
90	36,392	1,861	31,0	36,5	42,5
95	37,998	1,765	33,0	38,0	44,5
100	39,571	1,717	35,0	39,5	46,5
105	41,017	1,766	35,0	41,0	47,5
110	42,498	1,701	37,0	42,5	49,0
115	43,925	1,650	39,0	44,0	50,0
120	45,383	1,557	41,0	45,5	51,0
125	46,868	1,508	42,5	47,0	51,5
130	48,118	1,557	42,5	48,0	53,0

FONTE: A autora (2011)

4.1.5 Resultado das simulações aplicadas ao ambiente **Caso 5**

As simulações aplicadas ao processo de evacuação do ambiente **Caso 5**, referente ao tempo médio total em segundos aplicado a sala de cinema, possibilitaram levantar algumas informações numéricas, destacadas na tabela 7.

TABELA 7: Resultados das 1000 simulações referentes ao tempo médio total de evacuação total do ambiente descrito em **Caso 5**, aplicados em 26 casos de ocupação

Número de pedestres	Tempo médio (seg.)	Desvio padrão	Mínimo	Mediana	Máximo
5	16,419	1,594	10,5	16,5	19,5
10	17,541	1,046	13,5	17,5	20,5
15	18,230	0,898	15,0	18,0	21,0
20	18,852	0,875	16,0	19,0	21,5
25	19,506	0,855	17,0	19,5	22,5
30	20,154	0,880	17,5	20,0	23,0
35	20,980	0,832	18,5	21,0	23,5
40	21,776	0,880	19,5	22,0	25,0
45	22,709	0,887	20,5	22,5	26,0
50	23,765	0,906	21,0	24,0	27,0
55	24,752	0,876	22,0	24,5	28,5
60	25,964	0,898	23,5	26,0	29,0
65	27,058	0,918	24,5	27,0	30,0
70	28,287	0,952	25,5	28,5	32,0
75	29,485	0,964	27,0	29,5	32,5
80	30,669	0,938	28,5	30,5	34,5
85	31,925	0,990	28,5	32,0	35,0
90	33,196	0,992	29,5	33,0	36,5
95	34,382	0,961	32,0	34,5	37,5
100	35,707	0,971	32,5	35,5	39,0
105	36,938	0,987	34,0	37,0	41,0
110	38,179	0,943	35,5	38,0	42,0
115	39,507	1,028	36,5	39,5	43,5
120	40,709	0,968	38,0	40,5	44,0
125	42,052	0,977	39,5	42,0	45,5
130	43,036	0,964	40,5	43,0	47,0

FONTE: A autora (2011)

Também pode ser verificado que para cada um dos 26 casos de lotação analisados os valores do tempo médio total de evacuação e a mediana são próximos, o que pode ser observado numa situação que envolva dados uniformes, já que há uma distribuição estabelecida dos dados.

4.2 COMPARAÇÃO NUMÉRICA DOS CASOS ANALISADOS

O tempo médio total estimado para a evacuação das lotações analisadas, para os 5 casos verificados, encontra-se apresentado na tabela 8.

TABELA 8: Resultados das simulações para os 5 casos de geometria analisados

Número de pedestres	Caso 1	Caso 2	Caso 3	Caso 4	Caso 5
5	13,584	13,439	13,448	13,589	16,419
10	14,621	14,438	14,605	14,597	17,541
15	15,228	14,991	15,440	15,272	18,230
20	15,685	15,426	16,659	15,973	18,852
25	16,316	15,869	18,240	16,885	19,506
30	17,029	16,552	20,074	18,049	20,154
35	18,037	17,565	22,120	19,324	20,980
40	19,039	18,869	24,168	20,645	21,776
45	20,273	20,320	26,180	22,142	22,709
50	21,44	21,846	28,299	23,745	23,765
55	22,707	23,343	30,276	25,360	24,752
60	24,102	24,831	32,458	26,958	25,964
65	25,307	26,331	34,496	28,591	27,058
70	26,56	27,697	36,553	30,169	28,287
75	27,989	28,894	38,698	31,778	29,485
80	29,283	30,192	40,737	33,333	30,669
85	30,558	31,343	42,774	34,882	31,925
90	32,003	32,560	44,788	36,392	33,196
95	33,261	33,703	46,881	37,998	34,382
100	34,502	34,867	48,949	39,571	35,707
105	35,789	35,977	50,953	41,017	36,938
110	37,184	37,251	53,091	42,498	38,179
115	38,367	38,264	55,120	43,925	39,507
120	39,735	39,451	57,148	45,383	40,709
125	41,054	40,711	59,172	46,868	42,052
130	42,487	42,004	60,937	48,118	43,036

FONTE: A autora (2011)

A geometria da sala de cinema que minimiza o tempo total de evacuação pode ser estabelecido para cada uma das lotações separadamente, facilitando no estudo de uma lotação em específico. Destacando para cada caso o tempo mínimo obtido, pode-se perceber que os menores tempos, de acordo com os parâmetros estipulados, alternam-se entre os **Caso 1** e **Caso 2**.

Fazendo um comparativo geral das lotações verificadas, em 53,85% destacou-se o **Caso 1**, porém, para o caso de lotação máxima destaca-se o **Caso 2**. A diferença do tempo de evacuação em segundos, entre os **Casos 2** e **Casos 3** chegou a 45,07%. Considerando que a área física das salas tem o mesmo valor, tais diferenças podem

representar extrema relevância no sucesso de um processo de evacuação emergencial. Consequentemente, conduzindo a resultados mais satisfatórios e, por sua vez, minimizando transtornos caracterizados pela falta de planejamento e infraestrutura específicas, cruciais na diferença de tempo alcançada.

Como a lotação de uma sala de cinema não possui, na maioria das vezes, lotação máxima e constante, não pode-se generalizar o caso dito “ótimo” somente pela análise máxima, já que é vulnerável a qualquer lotação. Nesse sentido, o ambiente **Caso 1** destaca-se como a geometria que minimiza o tempo de evacuação em função do número de pedestres considerados, entre a maioria das lotações consideradas. Além disso, verifica-se estatisticamente, que há diferença significativa entre os tempos médios obtidos, destacando o caso que minimiza o processo de evacuação.

Esta análise proporcionou verificar os tipos de disposições geométricas que podem ocasionar estrangulamentos no ambiente e dificultar o fluxo de saída, no qual há um alto número de pedestres em um espaço extremamente limitado, levando a aglomerações e, consequentemente, reduzindo o escoamento do fluxo.

Tais características puderam ser observadas principalmente nos **Caso 3** e **Caso 4**, com geometrias não convencionais mas que aparentemente, sugerem maior direcionamento do fluxo de saída. Para esses dois casos, em especial, os corredores não atendiam as normas propostas por dimensões mínimas. Devido a tal parâmetro, foi realizada uma modificação na malha, aumentando em 2,0 metros a largura, distribuídos em 1,0 metro para cada lateral. Tal mudança não alterou os resultados finais do processo de evacuação, ou seja, a distribuição dessas geometrias não torna-se viável na limitação geométrica das poltronas de uma sala de cinema.

Para o **Caso 5** o direcionamento da saída para o corredor único altera o direcionamento do fluxo, que por haver mais entradas a densidade aumenta e, por sua vez, as possibilidades de movimentação são reduzidas.

Os dados resultantes para os casos analisados, podem ser visualizados por meio do gráfico de dispersão, apresentado na figura 26, possibilitando um compara-

tivo visual sobre as diferenças de tempo alcançadas, que tornam-se maiores com o aumento da lotação.

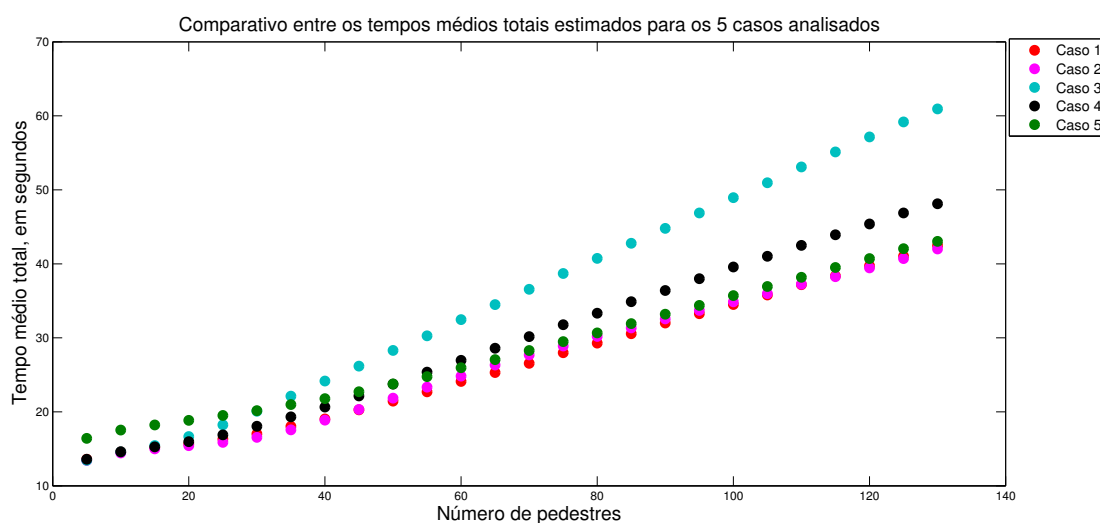


FIGURA 25: Comparativo dos tempos de evacuação para os 5 casos analisados

FONTE: A autora (2011)

Os efeitos da localização das saídas, por meio da modificação da geometria, são fundamentais no processo de evacuação quando relacionado ao número de pedestres. Com isso, associar e verificar o comportamento de tais parâmetros é fundamental na determinação da geometria de ambientes públicos, de modo a associar conforto, segurança e custo. Essas são questões de extrema importância em um projeto de edificação, que destaca a preocupação com questões de segurança, não somente nesse tipo de ambiente.

Nesse sentido, as normas e regras para a modelagem de salas de cinemas, podem ser utilizadas, sem grandes dificuldades, para outros ambientes de aglomeração, tais como auditórios, óperas e estúdios. Dessa forma, o estabelecimento de um modelo que verifique o relacionamento de dependência entre as variáveis tempo médio de evacuação e o número de pedestres, pode ser generalizado para demais lotações e ambientes.

Diversos modelos foram desenvolvidos para descrever e avaliar o comportamento e fluxo dos pedestres. Porém, devido a flexibilidade no traço de caminhos e na

escolha de rotas, a dificuldade consiste em determinar um modelo único que contemple as características físicas e mentais dos pedestres (ZAMPIERI, 2006). Entretanto, muitos desses estudos identificam aspectos peculiares quanto ao comportamento do fluxo de pedestres, e de grande importância na compreensão de suas relações.

Helbing et al. (2002) verificou que o comportamento do fluxo de pedestres, dentre outras características, segue a uma auto organização, na qual há uma relação entre as variáveis envolvidas. A fim de verificar se o comportamento numérico dos dados pode ser expresso por meio de uma possível relação de dependência entre as variáveis consideradas, pode-se utilizar a inferência estatística.

Busca-se ajustar os dados a um modelo que permita relacioná-lo ao estudo do comportamento e escoamento do fluxo. Verificando o gráfico de dispersão dos dados, percebe-se que o relacionamento entre as variáveis sugere uma dependência linear. Tal discussão é estruturada a seguir, especificamente para o **Caso 1**, destaque entre os casos ponderados.

4.3 FORMULAÇÃO ESTATÍSTICA DO MODELO

Ao introduzir um teste para comparação de médias ou um modelo de regressão polinomial, é necessário verificar se as suposições de aplicação dos testes são válidas. Os métodos estatísticos mais conhecidos empregados nessa análise, supõem que a variável resposta (ou dependente) tenha distribuição normal.

4.3.1 Teste de Gaussianidade

Para verificar a hipótese de Gaussianidade dos dados referentes ao tempo médio total de evacuação da sala de cinema proposta pelo **Caso 1**, foi aplicado o teste de Gaussianidade de Kolmogorov-Smirnov, utilizando como auxílio o *software* Minitab.

Este teste observa a máxima diferença absoluta entre a função de distribuição

acumulada assumida para os dados, no caso a Normal, e a função de distribuição empírica dos dados. Como critério, compara-se esta diferença com um valor crítico, para um nível de significância α , cujo valor adotado neste trabalho foi 0,05.

Por meio da figura 27, pode-se verificar o gráfico de normalidade para o tempo médio total de evacuação para os dados da tabela 3.

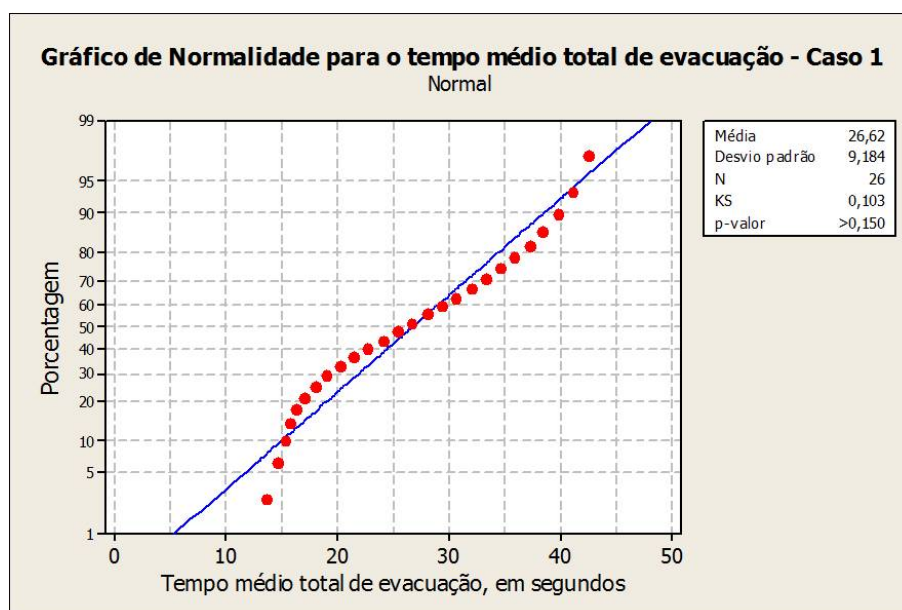


FIGURA 26: Teste de normalidade para os dados referentes ao tempo médio de evacuação da sala de cinema - **Caso 1**

FONTE: A autora (2011)

O gráfico de normalidade apresentado na figura 27 representa a porcentagem da ocorrência dos tempos médios totais de evacuação. Quando os dados se aproximam de uma reta, a suposição de normalidade é sustentável. Por meio da análise gráfica, portanto empírica, os dados podem seguir uma distribuição normal devido à natureza do seu comportamento. Para verificar a normalidade dos dados foi realizado o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, descrito a seguir.

Utilizando o teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov, tem-se que $p\text{-valor} > 0,150$, ou seja, o $p\text{-valor}$ é maior do que o nível de significância α . Logo, não rejeita-se a hipótese nula H_0 estabelecida em (3), consequentemente, têm-se evidências estatísticas para garantir a normalidade dos dados.

Diante da normalidade dos dados, pode-se construir um intervalo de confiança para estimar o tempo médio de evacuação. Assim, ao nível de 95% de confiança, pode-se afirmar que o tempo médio está compreendido entre 22,91 e 30,33 segundos.

A representação dos dados referentes ao tempo médio total de evacuação em função do número de pedestres para o ambiente **Caso 1** pode ser observada por meio do gráfico de dispersão, apresentado na figura 28.

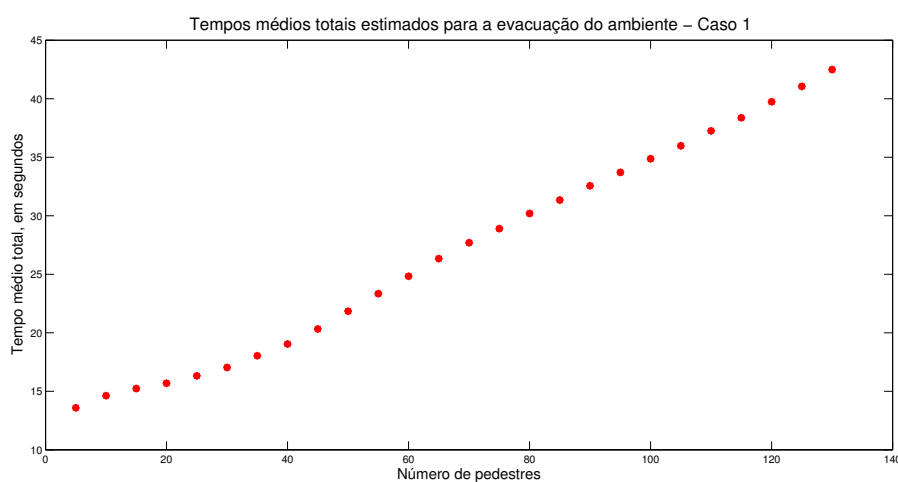


FIGURA 27: Gráfico de dispersão para os tempos médios totais estimados para o ambiente **Caso 1**

FONTE: A autora (2011)

A análise gráfica permite identificar uma possível relação entre as variáveis, que pode ser expressa numericamente, por meio de um ajuste polinomial de grau 1, 2 ou 3. A análise de regressão é uma das técnicas estatísticas mais utilizadas para identificar e modelar o relacionamento existente entre duas ou mais variáveis (Universidade Federal de Ouro Preto, 2008). Tal relacionamento será discutido na seção a seguir.

4.3.2 Relacionamento entre as variáveis tempo médio de evacuação e número de pedestres para o ambiente **Caso 1**

Para estabelecer um modelo de regressão polinomial, deve-se considerar algumas suposições:

- $E(\varepsilon) = 0$, ou seja, a média do erro ε (variável aleatória) é nula;
- A variância de ε é comum (homocedasticidade), ou seja, $V(\varepsilon) = \sigma^2$;
- Os erros são independentes, e seguem uma distribuição normal.

Analisando-se os resíduos pode-se verificar que são satisfeitas as premissas da análise de regressão.

A fim de verificar a hipótese de que os erros seguem uma distribuição normal foi aplicado o teste de normalidade de Anderson-Darling, conforme observado no gráfico de probabilidade normal, apresentado na figura 29, ao nível de significância de 5%.

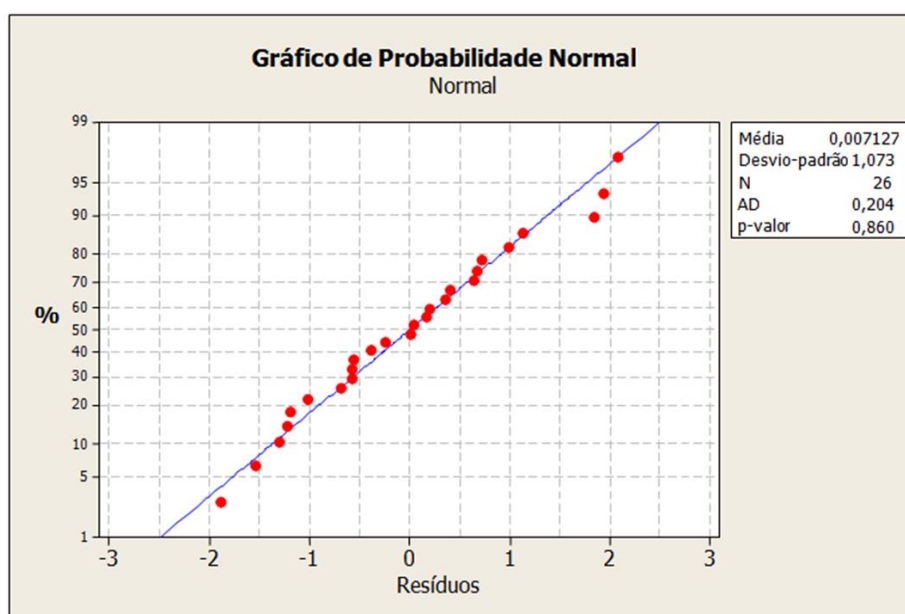


FIGURA 28: Gráfico de probabilidade normal - **Caso 1**

FONTE: A autora (2011)

O $p\text{-valor}=0,860$ estabelece evidências estatísticas para afirmar que os erros seguem uma distribuição normal, já que $p\text{-valor}>0,05$, além disso, tem-se que $E(\varepsilon) = 0$.

TABELA 9: Escores dos resíduos - **Caso 1**

Resíduos	
-1,88215	1,94099
1,85740	0,36658
-0,57568	-1,53036
-1,18135	-1,28970
-0,38595	-0,23196
0,21190	1,14568
0,73084	0,41759
0,99919	0,67692
0,16888	0,64569
0,00806	-0,68450
-1,00944	-0,56047
-1,22204	-0,57579
0,05257	2,09241

FONTE: A autora (2011)

O teste de Durbin Watson foi aplicado, por meio do *software Statgraphics*, a fim de verificar a independência dos resíduos, apresentados por meio da tabela 9. Verificou-se que os erros são independentes e que a hipótese nula H_0 dada em (25) não foi rejeitada. Relacionando os resíduos e a ordem de coleta, pode-se verificar que os dados encontram-se distribuídos aleatoriamente em torno do zero, não apresentando tendência. Logo a independência dos resíduos também pode ser diagnosticada por meio do gráfico apresentado na figura 30.

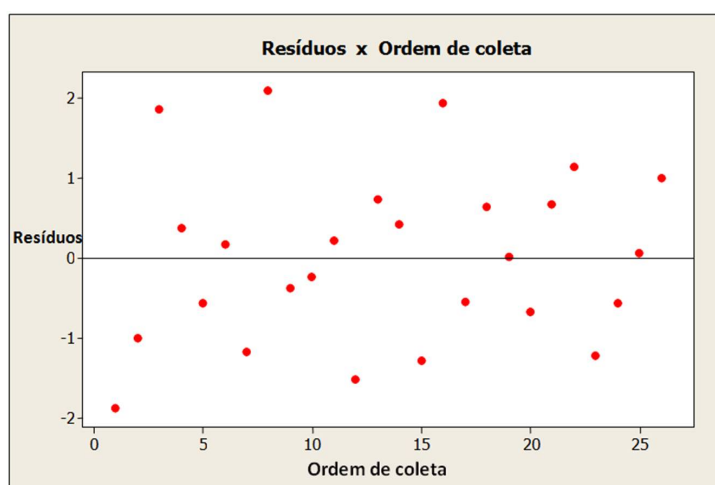


FIGURA 29: Resíduos versus ordem de coleta

A homocedasticidade garante que a variância dos resíduos é constante, sendo essencial para garantir a veracidade dos estimadores no Método dos Mínimos Quadrados. Utilizando a análise da dependência entre os resíduos e os valores ajustados, por meio do *software* Minitab, foi possível verificar que não há uma tendência no comportamento numérico e, os dados são distribuídos aleatoriamente em torno do zero, fornecendo evidências da homocedasticidade da variância dos resíduos.

Dessa forma, verificou-se que são válidas as suposições para aplicação da regressão polinomial.

A análise de regressão polinomial foi realizada de forma a minimizar o erro de ajuste, por meio do método dos mínimos quadrados. Conforme pode ser verificado por meio da figura 28 sugere-se uma relação de dependência polinomial entre as variáveis. Dessa forma, foram realizados ajustes lineares para os casos linear retilíneo, quadrático e cúbico.

Os dados referentes aos coeficientes podem ser observados por meio da tabela 10, que apresenta os coeficientes de R-Quadrado e R-Quadrado(ajustado) para os três casos de regressão analisados.

TABELA 10: Comparação dos coeficientes de determinação no ajuste polinomial

Ajuste	R-quadrado	R-Quadrado(ajustado)
Linear	0,992	0,992
Quadrático	0,998	0,998
Cúbico	1,0	1,0

FONTE: A autora (2011)

A variância explicada pelos três modelos foi significativa, sendo os coeficientes de determinação superiores a 0,9. Pode-se verificar que a dependência que exprime essa relação da melhor forma é a relação cúbica, cujos coeficientes foram iguais a 1. Logo um modelo de regressão polinomial, de grau 3, pode estabelecer satisfatoriamente o relacionamento de dependência entre as variáveis número de pedestres e tempo médio total de evacuação.

Dessa forma, foi realizada a regressão polinomial cúbica, por meio do *software* Minitab, sendo expressa graficamente por meio da figura 31.

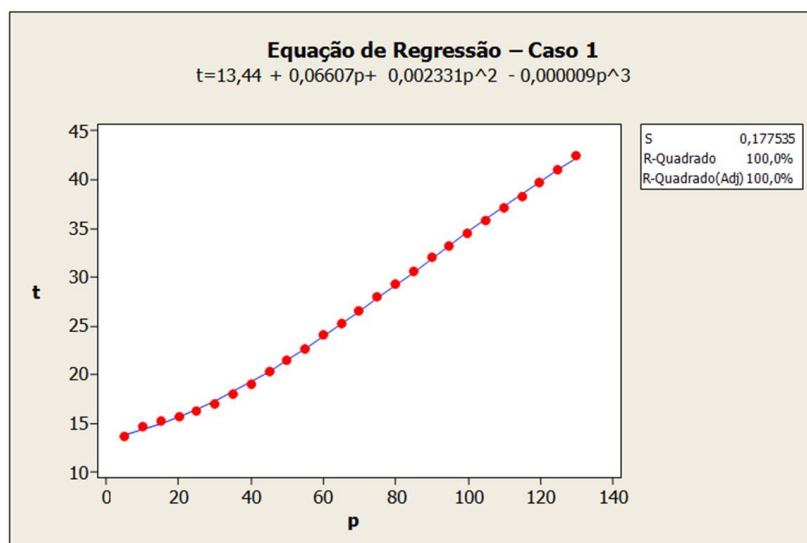


FIGURA 30: Regressão polinomial - **Caso 1**

FONTE: A autora (2011)

A equação de regressão é dada por

$$t = 13,44 + 0,06607p + 0,002331p^2 - 0,000009p^3, \quad (28)$$

onde t representa o tempo médio total de evacuação e p o número de pedestres presentes no ambiente.

Os valores dos coeficientes S, R-Quadrado e R-Quadrado(ajustado) obtidos na regressão avaliam a qualidade do modelo e, representam respectivamente, uma estimativa da variabilidade média sobre a linha de regressão, a proporção de variabilidade presente nas observações da variável resposta que é explicada pelo uso das variáveis regressoras no modelo e a sensibilidade ao número de termos incluídos em um modelo. Valores de R-Sq altos (próximos a 1) indicam que o modelo é mais explicativo. O valor de R-Quadrado encontrado foi igual a 1, o que representa a adequabilidade na proporção da variabilidade do modelo de ajuste aos dados estabelecidos.

Para verificar se o modelo obtido pela regressão é útil pode-se aplicar o teste de análise de variância, ANOVA, que realiza um teste de hipótese para a existência da regressão significativa. O teste verifica a seguinte hipótese

$$\begin{cases} H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \beta_3 = \dots = \beta_{p-1} = 0, \\ H_1 : \beta_i \neq 0, \text{ para pelo menos um } i. \end{cases} \quad (29)$$

A hipótese H_0 afirma que a regressão polinomial cúbica entre p e t não é significativa, contra a hipótese alternativa, H_1 , de que a regressão polinomial cúbica entre p e t é significativa. O desenvolvimento da análise de variância permite a elaboração do quadro da ANOVA, apresentado no quadro 4, obtido com o auxílio do *software* Minitab.

Fonte de variação	g.l.	Soma dos quadrados	Quadrado Médio	Estatística F	<i>p</i> -valor
Regressão	3	438797	146266	420304,6	0,000
Residual	23	8	0,348		
Total	26	438806			

QUADRO 4 - Análise de variância aplicada à regressão polinomial cúbica
FONTE: A Autora (2011)

Tem-se que g.l. representa o grau de liberdade e F é o valor crítico para a estatística do teste. De acordo com a distribuição F de Snedecor, considerando $\alpha = 0,05$ e graus de liberdade iguais a 3 e 23, obtêm-se que $F_{3,23}(0,05) = 3,03$. Como $F = 420304,6 > F_{3,23}(0,05)$, tem-se que o valor de p é menor que o nível de significância, sendo este igual a 0,05. Nesse caso, rejeita-se a hipótese nula H_0 , o que evidencia a significância do parâmetro utilizado, designado por tempo médio total de evacuação em função do número de pedestres, no modelo estimado.

A análise de variância permite verificar a significância de pelo menos um dos parâmetros obtidos no modelo. Deve-se então testar a significância de cada um dos parâmetros individualmente, ou seja,

$$\begin{cases} H_0 : \beta_i = 0, \\ H_1 : \beta_i \neq 0 \end{cases} \quad (30)$$

para $i = 1, 2, 3$. Se a hipótese $H_0 : \beta_i = 0$ for aceita, isso significa que a covariável x_i pode ser excluída do modelo. A estatística do teste é dada por:

$$t_i = \frac{\beta_i}{\sqrt{\sigma^2 D_{ii}}}, \quad (31)$$

onde D_{ii} é o j -ésimo elemento diagonal de $(X'X)^{-1}$. Seja n o número de elementos e p o número de variáveis, se $t_i > t_{(\frac{\alpha}{2}, n-p-1)}$, rejeita-se a hipótese nula H_0 , ou seja, aplicando o valor de t_i na curva acumulada da distribuição t de Student com $n-p-1$ graus de liberdade, pode-se obter o nível de confiança necessário para que a hipótese nula seja rejeitada, o que por sua vez, implica na inclusão (ou permanência) da variável x_i no modelo.

Utilizando o *software Statgraphics* foi aplicado o teste t para verificar a significância de cada um dos parâmetros, a , b , c e d , obtidos pela análise de regressão cúbica, conforme apresentado em (15) ou, equivalentemente, adotar a forma matricial geral, dada em (16) e verificar a significância dos parâmetros $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 , que incluem o teste para a constante.

Parâmetro	Estimativa	Erro	Estatística T	p -valor
β_0	13,4403	0,161991	82,9698	0,0000
β_1	0,0660454	0,0101964	6,47735	0,0000
β_2	0,00233187	0,00017376	13,42	0,0000
β_3	-0,00000874777	8,47076E-7	-10,327	0,0000

QUADRO 5 - Teste de significância dos parâmetros da regressão

FONTE: A Autora (2011)

O p -valor obtido para cada um dos coeficientes, individualmente, foi inferior ao nível de significância α . Com isso, há evidências estatísticas que revelam a significância dos parâmetros resultantes da regressão e a manutenção da ordem do modelo, já que todos os parâmetros contribuem na formulação do mesmo.

4.3.3 Modelos de regressão para os 5 casos analisados

O mesmo estudo foi realizado para os resultados provenientes das análises dos **Casos 2, 3, 4 e 5**. A título de ilustração, os dados prostaram-se satisfatórios para a aplicação da regressão, satisfazendo as suposições conforme verificado no **Caso 1**. Os modelos definidos encontram-se apresentados na tabela 11.

TABELA 11: Equação de Regressão para os 5 casos analisados

Ambiente modelado	Equação de Regressão
Caso 1	$t = 13,44 + 0,06607p + 0,002331p^2 - 0,000009p^3$
Caso 2	$t = 13,09 + 0,05961p + 0,002950p^2 - 0,000013p^3$
Caso 3	$t = 11,81 + 0,2190p + 0,002668p^2 - 0,000011p^3$
Caso 4	$t = 13,04 + 0,09784p + 0,002926p^2 - 0,000012p^3$
Caso 5	$t = 16,45 + 0,07745p + 0,001679p^2 - 0,000005p^3$

FONTE: A autora (2011)

Foram realizados o teste t para verificar a significância dos parâmetros de regressão para os outros 4 casos. Os resultados apontaram que o p -valor foi menor que o nível de significância, ou seja, a ordem dos polinômios são apropriadas estatisticamente e os parâmetros são significativos para o modelo.

4.4 VARIAÇÕES E ADAPTAÇÕES AO MODELO

As dimensões propostas no modelo foram estabelecidas a fim de satisfazer alguns critérios legais, tais como número de saídas e dimensões. Porém numa situação real, pode haver outras funcionalidades e/ou interferências, como por exemplo, o bloqueio de uma das portas de saída, que ocasionaria aumento do tempo total de evacuação, devido ao direcionamento a um único ponto.

Neste sentido, foram realizadas as simulações para o mesmo processo de modelagem descrito na seção anterior, porém, direcionando o fluxo a uma única saída. Para tais casos, o aumento da média do tempo total referente a evacuação oscilou entre 30% a 35% sobre os 26 casos de lotação analisados, quando comparado as saídas

convencionais. Tais resultados verificam a importância em se adequar o ambiente e cumprir os critérios estabelecidos.

Outra variação aplicada ao modelo foi a inclusão das especificações para cadeirantes, ou pedestres em cadeiras de rodas - P.C.R., conforme destaca a Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004). Conforme apresentado na tabela 1, para um ambiente de lotação entre 101 e 200 pedestres, o número de poltronas reservadas para P.C.R. deve ser igual a 4. Dessa forma, para o caso de P.C.R. é necessário adequar o modelo, já que a área ocupada deve ter dimensões mínimas de $0,8\text{ m} \times 1,2\text{ m}$, e o movimento das células e suas atualizações, reformulados.

No modelo inicial, cada pedestre ocupa uma célula, ou um elemento do autômato celular. Porém, tal área não é suficiente para um cadeirante. Dessa forma, foram especificados os locais reservados aos mesmos, de modo a garantir facilidade no processo de saída. Os locais reservados para os 4 cadeirantes encontram-se destacados na malha, e podem ser observados por meio da figura 32. As 18 poltronas foram substituídas por espaços reservados a 4 P.C.R..

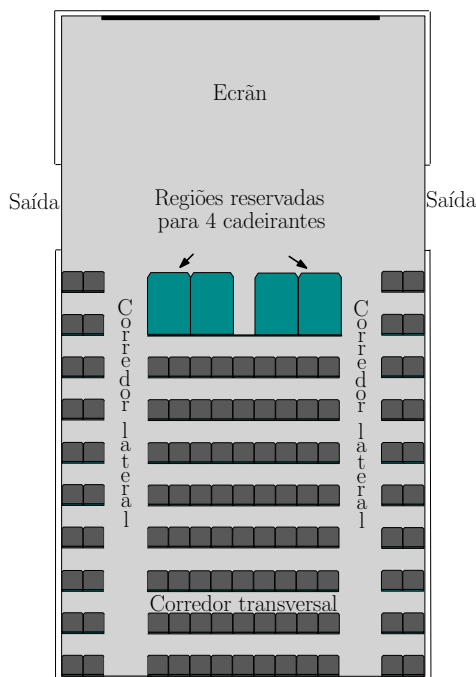


FIGURA 31: Locais destinados a P.C.R. - **Caso 1**

FONTE: A autora (2011)

Para que as dimensões de $0,8 \text{ m} \times 1,2 \text{ m}$ fossem obedecidas na definição da malha, foram destinadas 6 células a cada um dos cadeirantes que integrassem a simulação. Por sua vez, o seu deslocamento estaria restrito ao movimento em bloco, possível para o caso no qual as 3 células adjacentes laterais ou 2 frontais estivessem disponíveis simultaneamente, possível pela inclusão de uma nova função ao programa. Em outras palavras, a atualização das 6 células devem ser simultâneas e representando um movimento em bloco, no qual há dependência entre as próprias células e as células ditas vizinhas. O estado inicial numérico é definido conforme modelo inicial, proposto para o **Caso 1**, por exemplo. Nesse sentido, o movimento dos cadeirantes pode ser caracterizado numericamente, conforme disposto na figura 33.

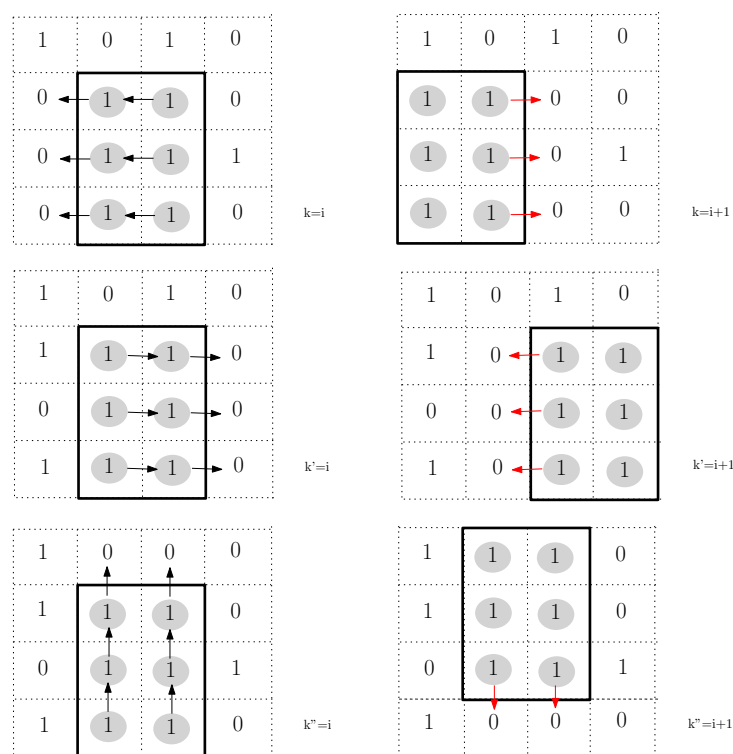


FIGURA 32: Atualização numérica da malha para os casos de P.C.R., para casos isolados de movimentações laterais (k, k') e frontal (k'')

FONTE: A autora (2011)

As iterações k e k' simulam o movimento lateral, para a esquerda e para a direita, respectivamente. Com a disponibilidade das células laterais adjacentes, estado 0, há atualização no autômato celular, por meio da malha auxiliar. Tal atualização

simula virtualmente o movimento de um pedestre. A iteração k'' simula o movimento frontal, no qual há atualização de quatro células: as que são ocupadas e as que tornam-se livres.

Cada cadeirante, ocupa uma área correspondente a $1,5 \text{ m}^2$. Para tal adaptação, a capacidade máxima da sala de cinema, foi alterada, tendo valor igual a 112 pedestres.

Para essa inclusão, define-se o número de pedestres e o número de cadeirantes no início da simulação. Independentemente, os pedestres e os cadeirantes são alocados aleatoriamente em seus espaços específicos, de onde iniciam a simulação.

Como o movimento é realizado em bloco, o fluxo da saída pode ser influenciado, já que ocasionalmente, as saídas podem ficar inacessíveis por certo intervalo de tempo, ou no caso, iterações. Considerando as 112 poltronas, e mais 4 regiões destinadas a P.C.R. foram realizadas simulações para uma capacidade máxima de 116 pedestres.

Foram consideradas diferentes lotações, que aumentavam com constante 5, como realizado anteriormente, até a lotação máxima. Nessa adaptação a lotação máxima para pedestres foi de 112, então foi utilizada a escala máxima de 110 e mais uma rodada de simulação para o caso de 112 pedestres.

Para cada lotação, foi realizada a análise de evacuação para 1, 2, 3 e 4 pedestres em cadeira de roda (P.C.R.), sendo empregadas 1000 simulações para cada. Os resultados médios encontram-se apresentados na tabela 12.

TABELA 12: Resultados das simulações com inclusão dos espaços para P.C.R. para o ambiente **CASO 1**

Número de pedestres	1 cadeirante	2 cadeirantes	3 cadeirantes	4 cadeirantes
5	13,8745	13,9055	13,8865	14,0012
10	14,8215	14,8945	14,8250	14,9762
15	15,4895	15,4670	15,4495	15,7592
20	16,0185	16,0705	16,0685	16,3287
25	16,8445	16,8675	16,8650	16,9912
30	17,6785	17,7395	17,8290	17,9214
35	18,7775	18,8485	18,9540	19,1002
40	19,8240	20,0690	20,2535	20,5324
45	21,1485	21,2755	21,3955	21,5312
50	22,3985	22,5765	22,7235	22,9216
55	23,6510	23,8080	23,9265	24,0213
60	24,8615	25,0440	25,3375	25,6312
65	26,0975	26,3740	26,5285	26,8221
70	27,3485	27,6885	27,9070	28,1123
75	28,6865	28,9455	29,1795	29,3421
80	29,9610	30,2155	30,5535	30,3193
85	31,2380	31,5425	31,7615	31,9789
90	32,5510	32,7925	33,1275	33,3317
95	33,8865	34,1200	34,3350	34,5254
100	35,1425	35,3635	35,6995	35,9945
105	36,4145	36,6205	37,0160	37,3218
110	37,7055	37,9555	38,2600	38,5193
112	37,8241	38,1247	38,4129	38,6787

FONTE: A autora (2011)

Os dados retratam o tempo total, em segundos, para a evacuação total, sob as condições pré-definidas na variação do modelo. A fim de verificar se há diferença significativa entre o tempo de evacuação com e sem a inclusão das normas para P.C.R. as simulações foram realizadas para o mesmo ambiente definido na variação do modelo, porém, desconsiderando a presença de cadeirantes.

Os resultados apontaram que o tempo médio total de evacuação diminuiu em média 2,5% entre todos os casos considerados, em relação ao tempo total quando incluído as movimentações dos cadeirantes e, cerca de 5,5% quando comparado às simulações do programa inicial, dado no ambiente **Caso 1** de mesma área e lotação máxima 130.

A inclusão desta variante não alterou significativamente o tempo total de evacuação. Isso pode ser explicado pelo posicionamento estratégico das regiões destinadas a P.C.R., situadas em locais de maior acessibilidade, o que por sua vez, é recomendado e garantido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (2004) e demais normas de segurança.

A fim de verificar o tempo de evacuação considerando apenas os cadeirantes, foram realizadas as simulações para o número de 1, 2, 3 e 4. O tempo médio total de evacuação obtido após as simulações, considerando os mesmos parâmetros, foi de 7,178 segundos, 7,672 segundos, 8 segundos e 8,862 segundos, para a evacuação de 1, 2, 3 e 4 cadeirantes, respectivamente.

Os resultados apontados pela aplicação das simulações, seja no modelo proposto ou em suas adaptações mostrou-se significativo para a evacuação de tais ambientes em situações reais. Aplicando um modelo utilizando autômatos celulares, proporcionou-se a evolução dos estados numéricos, caracterizando-o como de classe 2, conforme proposto por Gremonini e Vicentini (2008) e apresentado na seção 2.5.2.

Como a evacuação foi proposta para uma situação de emergência, houve dificuldade em validar experimentalmente os resultados, já que, induzir tal situação poderia ter consequências não calculadas. Dessa forma, optou-se por estabelecer uma estratégia alternativa: o tempo de evacuação total atingido pelo modelo foi comparado ao tempo de saída de uma sala de cinema real, com dimensões semelhantes ao ambiente **Caso 1** em numa situação de normalidade.

Foram verificadas a lotação inicial da sala de cinema e o tempo de evacuação das mesmas. Como os casos que foram utilizados para verificação não estavam associados a situações de emergência, não havia obrigatoriedade de saída imediata pelos pedestres ao término da exibição com velocidade desejada. As interações realizadas no algoritmo são tomadas isoladamente para os pedestres, e muitas vezes, há presença de casais ou grupos, definindo por sua vez, um outro comportamento do fluxo. Dessa forma, os tempos reais deviam ser superiores aos obtidos pela simula-

ção para cada lotação considerada. Caso contrário, as simulações não atenderiam aos parâmetros fixados que visavam minimizar o tempo total de saída do ambiente.

Nessa comparação, foi possível identificar o tempo de evacuação para 70% dos casos de lotação analisados nas simulações. Para esses casos, o tempo estimado foi inferior ao real, o que garante viabilidade ao modelo definido na simulação.

Com base nos tempos médios totais estimados para a evacuação total, pode-se observar que os mesmos mantêm-se baixos e podem ser questionados quanto à sua veracidade. Tal estimativa foi proporcionada pelo estabelecimento de hipóteses ao modelo, tomadas como suposições iniciais.

Admitir velocidade constante (1 m/s), direcionamento às saídas geometricamente mais próximas e movimento obrigatório caso houvesse disponibilidade espacial são questões que associadas às posições estratégicas dos corredores e saídas podem facilitar o comportamento do fluxo de saída, visto que o número das saídas e suas dimensões foram estabelecidas buscando satisfazer as normas e restrições existentes. Como haviam duas saídas, com medidas fixadas, o número de células correspondentes ao ponto desejado pelo algoritmo foi igual a 8, consequentemente, a evacuação alcançaria sucesso em qualquer uma das células estratégicas.

Essas são algumas das questões que devem ser avaliadas no processo de evacuação de ambientes, que envolve variáveis de diversas naturezas e, geralmente, não podem ser mensuráveis ou definidas, mas estimadas de acordo com o comportamento numérico dessas mesmas variáveis nas situações de interesse. Com isso, a utilização da inferência estatística no estudo da formulação e validação do modelo, de acordo com os resultados numéricos das simulações, é fundamental para justificar o comportamento numérico dos parâmetros envolvidos.

5 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Desenvolver, estruturar e arquitetar um ambiente é uma tarefa que exige grande responsabilidade. Tratando-se de um ambiente liberado para uso público, essa preocupação é ainda maior, já que questões relacionadas à segurança e conforto devem satisfazer algumas recomendações de órgãos de fiscalização. Entidades atuam na prevenção e fiscalização de obras, de forma a garantir integridade física e conforto ao público a que é direcionado.

Associado a tais aspectos legais, o emprego de relações numéricas pode facilitar na generalização dos resultados, simulando por exemplo, situações que poderiam ser validadas apenas por meio de experimentos reais. Com isso, há ganhos no tempo de implantação e no custo de tais modificações, permitindo ainda uma generalização em maior escala numérica.

O estudo da dinâmica de pedestres aplicada a análise do comportamento do fluxo é uma questão que destaca peculiaridades associadas as características de interação, individual e em grupo, dos pedestres. A inclusão de parâmetros e o direcionamento da metodologia de análise permitem a construção de analogias, exprimindo o comportamento do fluxo por meio de modelos.

Os modelos de simulação visam descrever as interações entre os pedestres, assim como verificar tais dependências na definição de aspectos espaciais, permitindo identificar características que interferem em sua trajetória, maximizando segurança e conforto e minimizando custos. No processo de evacuação de um ambiente, utilizando simulações computacionais, critérios como a delimitação do espaço e a localização dos obstáculos representam parâmetros que modificam estratégias na tomada de decisão. Dessa forma, é necessário estabelecer regras de interação entre os pedestres e também entre pedestres e obstáculos, sendo essas características próprias da

evolução dinâmica. As simulações computacionais podem estabelecer uma comparação nos resultados, predizendo uma melhor estrutura ou disposição do ambiente.

O fato de utilizar a modelagem do comportamento humano associada a tomada de decisão é uma questão de grande complexidade sob o ponto de vista numérico e computacional. Torna-se necessário mensurar aspectos físicos, mentais e psicológicos que possam interferir no trajeto. Nesse sentido, foi proposto um modelo de simulação de evacuação de ambientes numa situação de emergência sem pânico.

Considerar a aplicação da modelagem em tal condição deu-se pelo fato de estabelecer parâmetros iniciais para o comportamento humano, possibilitando sua generalização em trabalhos futuros. Para os casos que envolvem pânico, as características observadas na pesquisa podem ser utilizadas como suposições iniciais para a inclusão e análise de novos parâmetros, fundamentais na veracidade do modelo proposto.

A fim de incluir os parâmetros ao modelo foi necessário identificar os fatores que influenciam na trajetória dos pedestres. Tais inclusões foram realizadas como premissas ao modelo, que admitiu ausência de pisoteamento, contato físico entre os pedestres e movimento retrógrado, e considerando velocidade constante, tempo de reação e direcionamento às saídas mais próximas. Essas foram características simplificadas que foram incorporadas ao modelo.

As interações microscópicas entre os pedestres foram possíveis por meio de uma modificação na teoria dos autômatos celulares bidimensionais. Uma característica desse método encontra-se no fato de que há homogeneidade, ou seja, as regras de interação são tomadas como únicas para todas as células. A variante então encontra-se na limitação da movimentação, sendo representada virtualmente na definição dos estados numéricos dos elementos da malha. Essa modificação estava estritamente associada a posição do elemento no sistema de coordenadas cartesianas e, por sua vez, admitia complexidade face a inclusão de restrições.

Pode-se dizer que o ajuste na teoria dos autômatos celulares está também

relacionado a adaptação da malha para deficientes físicos, sendo considerado especificamente o caso dos cadeirantes. O aumento da região reservada para tais pedestres tornou necessário redefinir a função de transição, já que a movimentação não encontrava-se limitada individualmente, mas por meio da movimentação em bloco. Esse fato, superou uma das desvantagens, apresentada na literatura, em se empregar a simulação via autômatos celulares, já que, permitiu relacionar elementos de tamanhos diferentes num mesmo espaço regular definido.

As interações dinâmicas entre os pedestres pôde ser observada pela característica discreta do método empregado. As interações temporais davam-se em intervalos discretos, assim, o comportamento do fluxo poderia ser observado a cada passo de iteração, explicitando características próprias do fluxo de pedestres em situações de evacuação.

Tal relação de dependência mostrou-se essencial no traço de rotas de saídas do ambiente considerado, quando realizadas variantes geométricas. Verificou-se que interações dinâmicas ou estáticas são essenciais no movimento oscilatório do fluxo e, pode levar a modelagens que se destacam sob aspectos espaciais ou arquitetônicos, com significativa segurança.

Destaca-se então a simulação como uma ferramenta de experimentação. Essa vertente possibilitou o desenvolvimento de um modelo, cujas variáveis estavam relacionadas às premissas definidas e, validado estatisticamente, destacando o comportamento do fluxo no caso levantado para a aplicação da pesquisa.

Os resultados alcançados referem-se a uma abordagem totalmente nova e voltada para a modelagem do processo de evacuação de ambientes, que além das características técnicas que puderam ser discutidas, apresenta resultados de extrema relevância face o cenário brasileiro. A preparação em sediar a Copa do Mundo de futebol exige investimentos na área de segurança. O uso de simulações computacionais associado a tais análises é extremamente vantajoso, já que, permite comparações e diferentes variações dos parâmetros sem a necessidade real de ocorrência, que pode-

ria ocasionar no aumento dos custos, sejam financeiros, estruturais ou temporais.

Estudar o comportamento do fluxo de pedestres é uma questão que torna-se de extrema complexidade devido a própria vulnerabilidade da capacidade humana. Nesse sentido, algumas investigações surgiram durante a elaboração do trabalho, e explicitam-se válidas para a continuidade da pesquisa, tais como:

1. Incluir o pânico na modelagem do ambiente, destacando efeitos psicológicos dessa alteração comportamental na formulação dos parâmetros;
2. Empregar velocidades distintas entre os pedestres que atuam na simulação;
3. Trabalhar com a análise da evolução de grupos de pessoas dentro de uma sala de cinema, e não apenas, individualmente como foi proposto;
4. Simular focos que ocasionam o processo de evacuação, e verificar o comportamento do fluxo em diferentes regiões;
5. Utilizar outros métodos ou modelos de pedestres na modelagem do problema, exprimindo novas comparações.

REFERÊNCIAS

- AMÂNCIO, M. A.; SANCHES, S. P. Identificação das variáveis do meio físico urbano que incentivam os deslocamentos pelo modo a pé. **Anais do congresso Pluris**, 2005.
- ANDRADE, A. S.; FRIZZONE, J. A.; SENTELHAS, P. C. Simulação da precipitação diária para parnaíba e teresina, pi, em planilha eletrônica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, Campina Grande, v. 5, 2001.
- ARAUJO, L. **História do cinema**. 2008. [Online e acesso em 7-Agosto-2011]. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/cinema/historia-do-cinema/>>.
- BERKELEY, U. **Regression Analysis**. 1971. [online e acesso em 15-Setembro-2011]. Disponível em: <<http://elsa.berkeley.edu/sst/regression.html>>.
- BICHO, A. **Da modelagem de plantas à dinâmica de multidões: um modelo de animação comportamental bio-inspirado**. 2009.
- BRANCO, A. M. V. **O cinema nas décadas de 30 a 50 do século XX Uma visão histórica**. 2005. [Online e acesso em 11-Abril-2011]. Disponível em: <www.ipv.pt/forumedia/5/15.htm>.
- BRASIL. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT. Abnt nbr 950- acessibilidade a edificações, mobiliário, espaços e equipamentos urbanos. ABNT, 2004.
- BRASIL. CONFEA. **Conselho Federal de Engenharia, Arquitetura e Agronomia**. 2004. [online e acesso em 03-Junho-2011]. Disponível em: <<http://site2.confea.org.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?sid=4>>.
- BRASIL. Ministério da Cultura. **Cultura em Números: Anuário de Estatísticas Culturais**. 2009. [Online e acesso em 24-Janeiro-2011]. Disponível em: <http://www.cultura.gov.br/site/wp-content/uploads/2009/10/cultura_em_numeros_2009_final.pdf>.
- BRASIL. MINISTÉRIO DAS RELAÇÕES EXTERIORES. **História do cinema brasileiro, Ministério das Relações Exteriores**. 2009. [Online e acesso em 13-Setembro-2011]. Disponível em: <<http://www.dc.mre.gov.br/cinema-e-tv/historia-do-cinema-brasileiro>>.
- BRESSAN, G. **Modelagem e Simulação de Sistemas Computacionais**. [S.I.]: LARC, EPUSP, 2002.
- BRIGUENTI, J. R. N. **Simulação e otimização de uma linha de manufatura em fase de projeto**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Engenharia de Itajubá, 2006.
- BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. **Numerical Analysis**. [S.I.]: LTC, 1988.

CHAO, L. L. **Statistics - Methods and Analyses**. [S.l.]: Mc Graw Hill, 1974.

CHÁVEZ, G. C.; LIANG, Z. Sistema celular para reconhecimento de padrão invariante. Anais do IV Workshop em Tratamento de Imagens, NPDI/DCC/ICEx/UFMG, 2003.

COSTA, L. **O uso da simulação computacional como ferramenta de análise: um estudo de caso em empresa de bronzeamento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

DAPPER, F. **Planejamento de Movimento para Pedestres utilizando Campos Potenciais**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2007.

DIAS, F. **O papel do arquiteto**. 2011. [online e acesso em 10-Janeiro-2011]. Disponível em: <http://gazetaonline.globo.com/_conteudo/2011/01/743143-o+papel+do+arquiteto.html>.

EMERY, O. **Recomendação Técnica para Salas de Exibição Cinematográfica**. 2011. [online e acesso em 08-Setembro-2011]. Disponível em: <<http://www.abcine.org.br/artigos/?id=108&recomendacao-tecnica-para-salas-de-exibicao-cinematografica-parte-2>>.

ESCUADERO, L. F. **La simulación em la empresa**. [S.l.]: Duesto, 1973.

FERNANDES, I. R. **Engenharia de segurança contra incêndio e pânico**. [S.l.]: CREA-PR, 2010.

GAVIRA, M. O. **Simulação computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**. Dissertação (Mestrado) — Universidade de São Paulo, USP, 2003.

GHIORZI, T. **Aglomeraciones humanas**. 2011. [online e acesso em 15-Agosto-2011]. Disponível em: <<http://ghiorzi.org/aglom.htm>>.

GREMONINI, L.; VICENTINI, E. Autômatos celulares: Revisão bibliográfica e exemplos de implementações. 2008.

GUIMARÃES, P. R. B. **Métodos Quantitativos Estatísticos**. [S.l.]: IEDES, 2008.

GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. [S.l.]: Makron Books, 2000.

HAMMERSLEY, J. M.; HANDSCOMB, D. C. **Monte Carlo Methods**. [S.l.]: Menthuen, 1964.

HARRELL, C. et al. **Simulação otimizando os sistemas**. [S.l.]: Instituto IMAM, 2002.

HELBING, D. A mathematical model for the behavior of pedestrians. Behavioral Science, 1998.

HELBING, D.; FARKAS, I.; VICSEK, T. Simulating dynamical features of escape panic. Nature, 2000.

HELBING, D. et al. Simulation of pedestrian crowds in normal and evacuation situations. 2002.

HELBING, D.; KELTSCH, J.; MOLNAR, P. Modelling the evolution of human trail systems. **Nature**, 1997.

JAMES, B. **Probabilidade: Um curso em nível intermediário**. [S.l.]: LTC, 1996.

JIAN, L.; LIZHONG, Y.; DAOLIANG, Z. Simulation of bi-direction pedestrian movement in corridor. Elsevier, 2005.

JIANG, B.; CLARAMUNT, C. Integration of space syntax into gis for modelling urban spaces. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 2, p. 161–171, 2002.

KULAKOWSKI, K.; WAS, J.; TOPA, P. Simulation environment for modeling pedestrian dynamics. Intelligent Information Systems, 2010.

LARRÃNAGA, A. M. **Análise do Padrão Comportamental de Pedestres**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2008.

LEOTTI, V.; BIRCK, A.; RIBOLD, J. Comparação dos testes de aderência à normalidade kolmogorov-smirnov, anderson-darling, cramer-von mises e shapiro-wilk por simulação. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

LEVINE, D. M. et al. **Estatística: Teoria e Aplicações**. [S.l.]: LTC, 2005.

LIMA, E. B. **Modelos microscópicos para simulação do tráfego baseados em autômatos celulares**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal Fluminense, 2007.

LUSTOSA, P.; PONTE, V.; DOMINAS, W. Simulação. Corrar, L.J. Pesquisa Operacional para decisão em contabilidade e administração: contabilometria, 2004.

MARQUES, J. M.; MARQUES, M. A. M. **Estatística Básica: Para os cursos de Engenharia**. [S.l.]: Domínio do Saber, 2005.

MASCARELLO, F. **História do cinema mundial**. [S.l.]: Papirus, 2006.

MONTEVECHI, J.; DUARTE, R.; NILSON, G. O uso da simulação para análise do layout de uma célula de manufatura. Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção, 2003.

MOORE, H. J.; WEATHERFORD, R. L. **Tomada de Decisão em administração com Planilhas Eletrônicas**. [S.l.]: Bookman, 2005.

MULLER, A. Simulações estocásticas: O método de monte carlo. Universidade Federal do Paraná, UFPR (Monografia), 2008.

MUNIZ, A. et al. Simulação na implementação tecnológica: Solução ou problema? Revista de Ciência e Tecnologia, 2002.

NEUFERT, E.; NEUFERT, P. **Arte de projetar em arquitetura**. [S.l.]: Gustavo Gili, 2004.

NEUMANN, J. von. Theory of self-reproducing automata. Elsevier Science, 1996.

OLIVEIRA, A. **Nível de segurança inaceitável nas salas de cinema. Diário Oficial.** 2003. [Online e acesso em 24-Abril-2011]. Disponível em: <<http://www.portaldosalunos.com/noticias/noticia.php?id=2208>>.

PAES, A. T. Por dentro da estatística. Einstein: Educ Contin Saúde, v. 7, p. 3–4, 2009.

PARANÁ. Comando do Corpo de Bombeiros. **Funcionamento da Vistoria pelo Corpo de Bombeiros em Curitiba.** 2002. [online e acesso em 12-Junho-2011]. Disponível em: <<http://www.policiamilitar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=209>>.

PARANÁ. Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Paraná - CREA-PR. **Histórico.** 2011. [online e acesso em 20-Maio-2011]. Disponível em: <<http://www.crea-pr.org.br/>>.

PEREZ, G. J. Streaming, disruptive interference and power-law behavior in the exit dynamics of confined pedestrians. Physica A, v. 312, p. 609–618, 2002.

RAMOS, F. **História do cinema brasileiro.** [S.l.]: Art, 1987.

REBOUCAS, F. **História do Cinema Brasileiro.** 2008. [Online e acesso em 5-Fevereiro-2011]. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/cinema/historia-do-cinema-brasileiro>>.

RUNIONS, A. et al. Modeling and visualization of leaf venation patterns. ACM Transactions on Graphics, ACM Press, v. 24, p. 702–711, 2005.

RUNIONS, A.; LANE, B.; PRUSINKIEWICZ, P. Modeling trees with a space colonization algorithm. EUROGRAPHICS WORKSHOP ON NATURAL PHENOMENA, 2007.

SALIBY, E. Tecnologia de informação: Uso da simulação para obtenção de melhorias em operações logísticas. Centro de Estudos em Logística, 1999.

SAMOHYL, R. W. **Controle Estatístico de Qualidade.** [S.l.]: Campus, 2009.

SCHEID, F. **Análise Numérica.** [S.l.]: Mc Graw-Hill, 1991.

SCHEUNEMANN, E. **Simulação de Monte Carlo.** 1995. [online e acesso em 15-Julho-2011]. Disponível em: <<http://risk.nuvvo.com/lesson/5864-simulacao-de-monte-carlo>>.

SILVA, T. et al. Simulações computacionais aplicadas ao processo de evacuação de ambiente: Uma aplicação do método de simulação de monte carlo via autômatos celulares. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO)**, 2011.

SILVA, T. C. et al. Análise comparativa da lotação e da disposição das saídas no processo de evacuação de um cinema: simulação o via autômatos celulares. **Iberian Latin American Congress on Computational Methods in Engineering (CILAMCE)**, 2011.

SILVA, T. C. et al. Simulação de monte carlo via autômatos celulares bidimensionais aplicada ao processo de evacuação de ambientes. **Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha (SPOLM)**, 2011.

SOUZA, A. **A segurança das casas noturnas e similares.** *Articulistas*. 2005. [Online e acesso em 12-Maio-2011]. Disponível em: <<http://www.24horasnews.com.br/evc/index.php>>.

STEINBERG, J. G. **Desenvolvimento de modelo para simulação de situações de evacuação de multidões.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, 2005.

TAVEIRA, R. A. **Uma metodologia para aperfeiçoamento da mudança para um sistema de produção Just-in-Time em uma indústria metalúrgica, usando simulação discreta e técnicas de projeto de experimentos de Taguchi.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

TEKNOMO, K. Application of microscopic pedestrian simulation model. Elsevier, 2006.

TOFFOLI, T. Cellular automata machines. Elsevier Science, 1987.

TOYAMA, M. C. **Uma abordagem multiagentes para a dinâmica de pedestres.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

TREGENZA, P. R. **The Design of Interior Circulation.** [S.l.]: Van Nostrand Reinhold Company, 1976.

Universidade Federal de Ouro Preto. **Análise de Regressão, Curso de Minitab.** 2008. [Online e acesso em 24-Maio-2011]. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/18855716/6-Analise-de-Regressao>>.

VIANA, H. L. Método para dimensionamento da quantidade ótima de sondas de produção em um campo de petróleo. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

VIHER, B.; DOBNIKAR, A.; ZAZULA, D. Cellular automata and follicle recognition problem and possibilities of using cellular automata for image recognition purposes. Elsevier: International Journal of Medical Informatics, 1998.

WAS, J. Experiments on evacuation dynamics for different classes of situations. Springer Heidelberg Dordrecht London New York, 2010.

WOLFRAN, S. **A new kind of science.** [S.l.]: Wolfran Media, Inc, 2002.

ZAMPIERI, F. L. L. **Modelo Estimativo de Movimento de Pedestres baseado em sintaxe espacial, medidas de desempenho e redes neurais artificiais.** Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2006.

ZAMPIERI, F. L. L.; RIGATTI, D.; DIÓGENES, M. C. Modelo de predição de fluxo de pedestres aplicado a ambientes urbanos. **XXI Anpet - Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino de Transportes**, v. 1, p. 12, 2007.

ZANELLA, L. Bebida alcoólica e direção: estatísticas de uma mistura cruel. 2008.

APÊNDICE A – CINE_MOV: CÓDIGO UTILIZADO PARA SIMULAÇÃO DE EVACUAÇÃO DO CINEMA - CASO 1

```

program cine_mov;
***** Dados de entrada *****
cine_res.txt narq - nome do arquivo de saída
    nx - número de células na direção x
    ny - número de células na direção y
    xp - abcissa da célula da porta
    yp - ordenada da célula da porta
    nsim - número de simulações
    número total de pedestres
*****
uses
    wincrt;
type
    tpt = record
        x,y : byte;
    end;
    vet1 = array[1..100] of longint;
    vet1 = array[1..15000] of longint;
    matb = array[0..100,0..100] of byte;
    mtpt = array[1..10000] of tpt;

***** Definição das variáveis *****
var
    arq : text;
    narq : string;
    nx,ny,
    xp,yp,
    nnpt : word;
    np,
    nsim : longint;
    npt : vet1;
    c : ^matb;
    p : ^mtpt;
    t : ^vet1;

***** Leitura dos dados de entrada *****

```

```

procedure ler;

begin
  assign(arq,'cine_mov.txt');
  reset (arq);
  readln(arq,narq);
  readln(arq,nx);
  readln(arq,ny);
  readln(arq,xp);
  readln(arq,yp);
  readln(arq,nsim);

  nnpt := 0;
  repeat
    nnpt := nnpt + 1;
    readln(arq,npt[nnpt]);
    until eof(arq);
  close(arq);
end;

***** Variáveis locais *****
procedure simula;
var
  k   : word;
  sim : longint;

procedure inic(np:longint);
var
  i,
  x,y : word;
  k   : longint;

begin

  for x := 1 to nx do
    for y := 1 to ny do
      c^[y,x] := 0;
  for x := 0 to nx+1 do
    begin
      c^[0,x] := 4;
      c^[ny+1,x] := 4;
    end;
  for y := 0 to ny+1 do
    begin
      c^[y,0] := 4;
      c^[y,nx+1] := 4;
    end;

```

```

for y := yp to yp+3 do
  begin
    c^[y,0] := 3;
    c^[y,nx+1] := 3;
  end;

y := 1;
for i := 1 to 10 do
  begin
    for x := 1 to 2 do
      c^[y,x] := 2;
    for x := 5 to 13 do
      c^[y,x] := 2;
    for x := 16 to 17 do
      c^[y,x] := 2;
    y := y + 2;
  end;

***** Definição das possibilidades do movimento nos corredores transversais *****
if np = 130
  then
    begin

      k := 0;
      y := 2;
      for i := 1 to 10 do
        begin
          for x := 1 to 2 do
            begin
              k := k + 1;
              c^[y,x] := 1;
              p^[k].x := x;
              p^[k].y := y;
            end;
          for x := 5 to 13 do
            begin
              k := k + 1;
              c^[y,x] := 1;
              p^[k].x := x;
              p^[k].y := y;
            end;
          for x := 16 to 17 do
            begin
              k := k + 1;
              c^[y,x] := 1;
              p^[k].x := x;
              p^[k].y := y;
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;

```

```

        end;
        y := y + 2;
        end;

        exit;
        end;

***** Alocação dos pedestres nas poltronas *****
for k := 1 to np do
    begin
        repeat
            x := 1 + random(nx);
            y := 1 + random(ny-10);
            until c^[y,x] = 2;
            c^[y,x] := 4;
            y := y + 1;

            c^[y,x] := 1;
            p^[k].x := x;
            p^[k].y := y;

            if (p^[k].y < 1) or (p^[k].y > ny) or
               (p^[k].x < 1) or (p^[k].x > nx)
            then
                begin
                    writeln('ini',p^[k].y,' ',p^[k].x);
                    readln;
                end;
            end;
        end;
    end;

***** Movimentações *****
procedure movimento(np:longint);

var
    i,j,
    k,nt : longint;

procedure mover;

var
    x1,x2,y1 : byte;

procedure trocar;

var

```

```

    aux : tpt;

begin
  if i <> k
  then
    begin
      aux := p^[k];
      p^[k] := p^[i];
      p^[i] := aux;
    end;
  end;

begin { mover }

  if (p^[k].y < 1) or (p^[k].y > ny) or
     (p^[k].x < 1) or (p^[k].x > nx)
  then
    begin
      writeln(p^[k].y, ' ', p^[k].x);
      readln;
    end;
  if p^[k].y > 20
  then
    begin

      y1 := p^[k].y;
      if p^[k].x < 9
      then
        x1 := p^[k].x - 1
      else
        if p^[k].x > 9
        then
          x1 := p^[k].x + 1
        else
          begin
            if random < 0.5
            then
              x1 := p^[k].x - 1
            else
              x1 := p^[k].x + 1;
            end;
          if c^[y1,x1] = 3
          then
            begin
              c^[p^[k].y,p^[k].x] := 0;
              p^[k] := p^[np];
            end;
          end;
        end;
      end;
    end;
  end;
end;

```



```

        j := j - 1;
        np := np - 1;

        exit;
        end;

if c^[y1,x1] = 0
then
begin
    c^[p^[k].y,p^[k].x] := 0;
    c^[y1,x1] := 1;

    p^[k].x := x1;
    p^[k].y := y1;

end
else
begin
    x1 := p^[k].x;
    y1 := p^[k].y + 1;
    if c^[y1,x1] = 0
    then
begin
        c^[p^[k].y,p^[k].x] := 0;
        c^[y1,x1] := 1;

        p^[k].x := x1;
        p^[k].y := y1;
        end;
    end;

trocar;

i := i + 1;
j := j - 1;

exit;
end;

x1 := p^[k].x;
y1 := p^[k].y + 1;
if c^[y1,x1] = 0
then
begin

    c^[p^[k].y,p^[k].x] := 0;
    c^[y1,x1] := 1;

```

```

    p^[k].x := x1;
    p^[k].y := y1;

    trocar;

    i := i + 1;
    j := j - 1;

    exit;
end;

y1 := p^[k].y;
if p^[k].x < 4
then
    x1 := p^[k].x + 1
else
    if p^[k].x > 14
    then
        x1 := p^[k].x - 1
    else
        if p^[k].x > 9
        then
            x1 := p^[k].x + 1
        else
            if p^[k].x < 9
            then
                x1 := p^[k].x - 1
            else
                if random < 0.5
                then
                    x1 := p^[k].x - 1
                else
                    x1 := p^[k].x + 1;

if c^[y1,x1] = 0
then
begin
    c^[p^[k].y,p^[k].x] := 0;
    c^[y1,x1] := 1;

    p^[k].x := x1;
    p^[k].y := y1;
end;

trocar;

```

```

    i := i + 1;
    j := j - 1;

end;

begin { movimento }

    nt := 0;
    repeat

        nt := nt + 1;

        i := 1;
        j := np;
        repeat
            k := i + random(j);
            mover;
            until j = 0;
        until (np = 0) or (nt > 1000);
        t^[sim] := nt;
    end;

***** Critérios de parada e dados de saída *****
procedure bolha;

var
    aux,
    max,
    i,j : longint;

begin
    max := nsim;

    repeat
        i := 0;

        for j := 1 to max-1 do
            if t^[j] > t^[j+1]
            then
                begin
                    aux      := t^[j];
                    t^[j]    := t^[j+1];
                    t^[j+1]  := aux;
                    i        := j;
                end;

            max := i;
        end;
    end;
end;

```

```

        until i = 0;
    end;

begin { simula }

    randomize;

    assign (arq,narq);
    rewrite(arq);

    for k := 1 to nnpt do
        begin
            if npt[k] > 130
            then
                npt[k] := 130;

                writeln(arq,npt[k]);

                for sim := 1 to nsim do
                    begin
                        writeln(k:10,npt[k]:10,nx:10,ny:10,sim:10);

                        inic(npt[k]);

                        movimento(npt[k]);
                        end;

                    bolha;

                    for sim := 1 to nsim do
                        writeln(arq,k:10,sim:10,t^[sim]:10);
                    end;

                close(arq);
            end;

        begin

            new(c);
            new(p);
            new(t);

            ler;

            simula;

        end.

```